



路面のポータブルすべり抵抗測定装置の開発と利用に関する研究

著者	安部 裕也
学位名	博士（工学）
学位の種別	課程博士
報告番号	甲第110号
研究科・専攻	工学研究科・建設工学専攻
学位授与年月日	2000-03-21
URL	http://hdl.handle.net/10258/2080

博士學位論文

路面のポータブルすべり抵抗測定装置の

開発と利用に関する研究

2000年3月

安部 裕也

①

博士学位論文

路面のポータブルすべり抵抗測定装置の開発と
利用に関する研究

安 部 裕 也

2000年3月

室蘭工業大学

路面のポータブルすべり抵抗測定装置の開発と利用に関する研究

論文目次

第1章 総論	3
1・1 はじめに	3
1・2 路面のすべり抵抗に関する研究の概要	6
1・3 すべり抵抗の性質	8
1・4 すべり抵抗の測定方法	11
1・5 本論分の目的と内容	15
第2章 路面のポータブルすべり抵抗測定装置の開発と性能	19
2・1 ポータブルテスター開発の目的	19
2・2 DF テスター(Dynamic Friction Tester)の原理と構造	20
2・3 DF テスターの測定手順と特徴	32
2・4 DF テスターの ASTM 規格化	39
2・5 DF テスターS タイプの開発	50
2・6 本章のまとめ	61
第3章 PIARC 国際共同実験による DF テスターの国際比較	65
3・1 PIARC 国際共同実験の目的	65
3・2 PIARC の組織	66
3・3 実験個所	67
3・4 摩擦測定装置と試験タイヤ	71
3・5 DF テスターと他の測定装置との相関分析	73
3・6 DF テスターと国際摩擦指標 (IFI) の関係	110
3・7 本章のまとめ	125
第4章 DF テスターとCTメータによるIFI推定方法の検討	127
4・1 はじめに	127
4・2 路面のすべり抵抗とテクスチャーの関係	128
4・3 すべり抵抗・テクスチャー・速度の関係モデル化	130
4・4 新しいテクスチャー測定装置の開発	133
4・5 IFIを用いたDFテスター測定値の舗装マネジメントへの応用	140
4・6 本章のまとめ	142

第5章	DFテスターSタイプによる歩道路面のすべり抵抗測定——	144
5・1	研究の目的.....	144
5・2	DFテスターSタイプの性能評価	145
5・3	歩道舗装材料の摩擦抵抗係数測定と評価.....	154
5・4	本章のまとめ	167
第6章	結 論.....	170
6・1	本論文で得られた結論.....	171
6・2	今後の研究課題	174

第1章 総 論

1・1 はじめに

最近において舗装路面に求められる条件は大きく変化してきている。1950年代においては、増大する交通荷重に耐えうる舗装構造を構築するかが主要な課題であったが、1970年代から1980年代にかけては舗装路面の供用性をいかに確保するかが課題となってきた。すなわち、わだち掘れ、ひび割れ、摩耗など種々の路面の破壊現象が生み出され、路面性状(surface characteristics)を正常に維持管理することに強い関心が向けられてきた。1990年代に入り、道路利用者や住民の路面の質的向上に対する要求が非常に高くなってきており、舗装路面のサービス水準の向上や維持管理に対する新たな挑戦が強く求められてきている。特に、これまでの道路延長を拡張して舗装率を高めるという単一の目的から、平坦性など乗心地や耐久性などの基本的な機能性から、さらにすべり事故や視認性などの走行安全性、ゆとりと美しさなどの快適性、排気ガス・騒音・振動など環境保全、省資源・省エネルギーの経済性などニーズが多様化してきている。これら舗装路面に要求される機能の例を図1.1¹⁾に示すが、

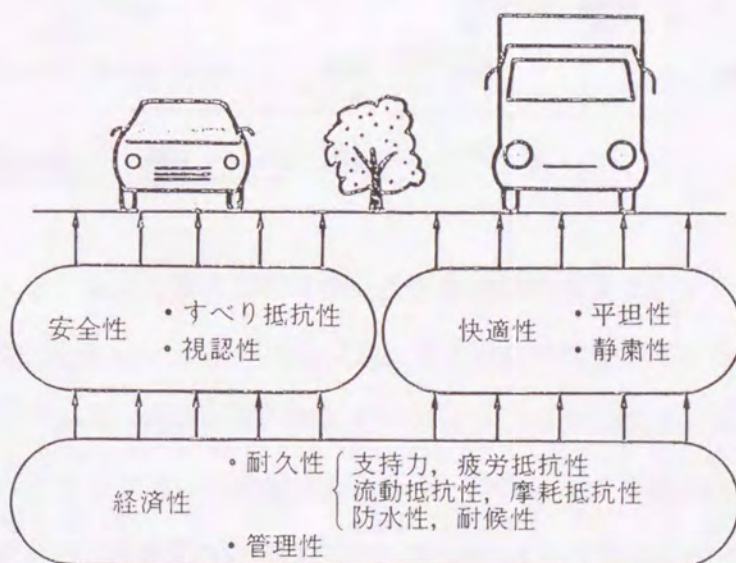





























図1.1 舗装路面に要求される機能

1998年の土木学会年次学術講演会（神戸大会）において「路面は語る—路面は安全性、乗心地、景観にどのような役割を果たしているか？—」²⁾と題した研究討論会が開催されたことから、舗装路面の特性がこれから注目すべき対象であることを物語るものであるといえる。

一方、これらの課題に対して、路面の特性の面からは、1) すべり抵抗、2) 路面の平坦性、3) ころがり抵抗（エネルギー）、4) タイヤと路面間の騒音、5) 路面の反射特性、についての研究が必要とされている。安全、快適、環境および経済の4つの問題分野に対する上述の路面特性の影響度合を示すと図—1.2 のようになる³⁾。

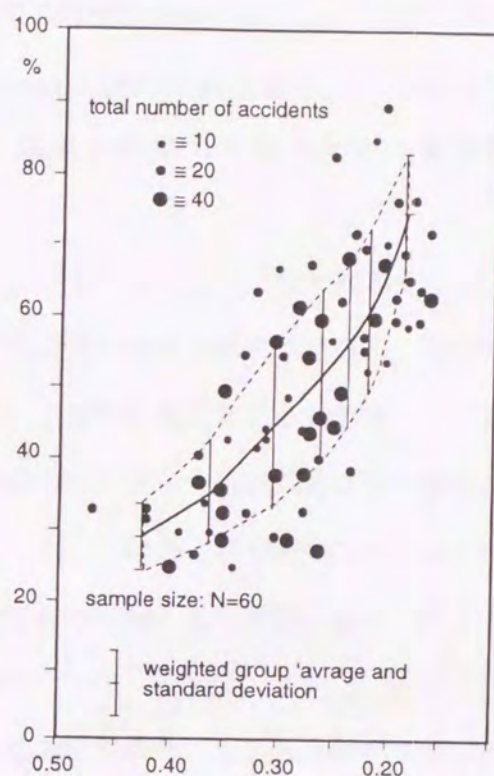
		Requirements			
		Safety	Comfort	Environment	Savings
Influencing Factors	Skid Resistance				
	Evenness	Longitudinal			
		Transversal			
	Rolling Resistance				
	Tyre / road Noise				
	Reflection Characteristics				

KEY :  Strong influence  Pronounced influence  Moderate influence  Weak influence  Nil

図—1・2 路面に要求される機能と影響要因の関係マトリックス³⁾

このうち、すべり抵抗(skid resistance)は交通安全と密接に関係していることから路面の最も重要な特性である。今日、モータリゼーションの高度の進展により人々の生活は自動車交通に依存する度合いが非常に大きい、その一方で交通事故により多大の尊い命が奪われている。自動車の走行はタイヤの接触面のみで直接的に関係しており、特に路面の摩擦抵抗に依存する度合いが極めて大きいことから、交通事故の多くは路

面のすべり抵抗に関係していると考えることができる。図—1・3はK-H. Shulzeら⁴⁾による西ドイツ（当時）の幹線道路における湿潤時事故率とすべり抵抗の関係を示したものである。この図で横軸はすべり抵抗は車輪ロック方式で80 km/hにおいて測定された縦すべり抵抗を表しているが、すべり抵抗が増加するにつれて湿潤事故の割合が低下する傾向を明確に示している。



Locked wheel braking force coeff. at 80 km/h

図—1・3 すべり抵抗と湿潤時事故の割合の関係⁴⁾

このように、タイヤと路面間の摩擦(friction)は車両の方向と速度をコントロールする基本的なパラメータであるので、安全な運転条件を確保する鍵となる。したがって、道路および空港滑走路で車両が安全に走行するためには、適切かつ十分な路面のすべり抵抗の水準を確保することが必要であり、道路の線形設計や交通安全管理上において配慮すべき重要な要素である。このため、各国ではすべり抵抗の測定装置を開発する一方で、路面の維持管理のためのルーチンワークとして、路面のすべり抵抗の測定チェックが行われているが、今後研究されるべき課題が多くある。

1・2 路面のすべり抵抗に関する研究の概要

1・2・1 摩 擦

「2つの固体が接触していて、それらが相互に運動しようとするとき、あるいは運動しているときには、接触していることが原因となって生じる抵抗が作用する。この抵抗を摩擦(friction)または摩擦力(frictional force)と言い、前者を静摩擦(static friction)と言い、後者を動摩擦(dynamic friction)と言う。」⁵⁾ 摩擦力は接触面に平行な方向に作用する力であるが、荷重で摩擦力を割ったものを摩擦係数(coefficient of friction)と言う。

もし、摩擦という力が存在しなかったら、我々はどうなるであろうか？ 人は歩くことも出来ないし、机の上に置いたものがすべり落ち、机や椅子もまた動き出す。マッチもライターも使えない、建物を建てることも出来ないであろう。総ての物は低い方へと走り続けることになる。万有引力や空気の恩恵を我々がほとんど意識しないように、摩擦の恩恵もまた、我々はほとんど意識していない。人と摩擦とは古代から現代に至るまで、日常生活においても、また先端技術にいたるまで広い分野でいろいろと関わり合いをもっている。

18世紀中頃のイギリスの産業革命、1789年のフランス革命には色々な機械技術が発展するが、摩擦は直接商売につながらないため、いつも技術発展の縁の下の方の力持的存在であった。だが機械発展の重要な担い手であったことには間違いはない。そして、この地味な摩擦の研究に没頭した学者達の存在を忘れてはならないであろう。

摩擦についての科学的研究の発端を開き、又、摩擦係数と言う概念を取り入れた最初の人にはルネサンス時代の大科学者、哲学者、芸術家であるレオナルド・ダ・ビンチ(1452~1519)によるものである。しかし、ルネサンス時代には力という概念が明確になっておらず、それが明確になるのは、ニュートン(1643~1727)が出現してからである。それもレオナルド・ダ・ビンチ出現後、200年を過ぎてからである。そのあと、アモントン(1663~1705)を経由してクーロン(173

6～1806)の時代へと移り、ようやく凹凸説の完成を迎えるのである。それまで何と約300年を要している。又、デザギュリエ(1683～1744)が分子説を唱え、ユーイング(1855～1935)、ハーデイ(1864～1934)を経由して凝着説がほぼ完成するまで約200年が経過している。17, 18世紀のアモンテン、クーロンの時代にも電動機はなかった。そのため、レオナルドからクーロンの時代にいたる間、摩擦の実験は主として静摩擦に関しておこなわれた。18世紀中頃のイギリスの産業革命や1789年のフランス革命による諸機械の発達等により、“摩擦”というものが専門の分野で研究せざるを得なくなったのである。

1・2・2 路面のすべり抵抗に関する既往の研究

1919年米国において路面におけるすべり摩擦抵抗試験の必要性をAggが提唱し、1923～27年代には初の路面試験が行われた。1931年よりMoyer教授によって系統的に路面の状態、タイヤ種別の影響の関係が試験されている。

1923年にはフランスにおいて、Debes, Hupunerにより路面のすべり試験の必要性が提唱され、1926年にはDebes, Naud, Hupunerにより牽引車を使用して実験を行っている。1931年にはG. Mathiewにより、1933年にはM. Boutteville, Lehanner, Boulyによって各々独自の試験車を作り、各種のすべり摩擦抵抗を試験している。また、1935年には、瀝青乳剤製造組合によりStradographと呼ぶ路面のすべり摩擦係数測定装置を作り、各種路面の横すべり摩擦係数を測定している。

また、1930～33年にわたりドイツにおいて、縦すべり摩擦抵抗を測定し、摩擦係数とタイヤと路面との間の圧力との関係を発表している。また、乗用車にトレーラーを牽引して、走行中に制動を車輪にかけ、縦すべり摩擦係数を測定している。セメント系、アスファルト・コンクリート系、タール・マカダム系路面における実測値として乾燥、湿潤路面の結果を発表している。

1940年代以降、路面のすべり抵抗に関する研究はアメリカではペンシルベニア州立大学交通研究所のWolfgang E. Meyer教授を中心に室内実験および現場測定の両

面から展開され、その後 John J. Henry 教授らに引き継がれて理論的研究および ASTM における測定装置の規格化へと発展してきた。一方、イギリスでは道路研究所(Road Research Laboratory)を中心に実務的な面から多くの研究が行われ、測定装置の開発が行われてきた。その他、フランス、ドイツ、ベルギー、スウェーデンなどヨーロッパ諸国においては国の研究所を中心に道路の設計および管理の立場からの研究が行われてきており、PIARC などの国際機関での活動に活かされている。

日本においては、1937年に内務省土木試験所の島田八郎技師により土木試験所報告第四十号で“路面の縦及び横滑り摩擦抵抗に及ぼす路面種別と其の性状との影響に就いて”の題目で発表されている。この時点でこれだけの研究発表をされたことに對して、驚異と敬意を払わずにはいられない。

また、1969年には市原薫氏が建設省土木研究所より土木研究所報告135号の3で“路面のすべり抵抗に関する研究”と題して発表され、1965年同氏と越正毅氏により技術書院から“路面のすべり”で出版され、数回にわたり改定がなされ、1997年には市原薫氏と小野田光之氏により“路面のすべりとその対策”として出版され数少ない“すべりの参考書”としての役目を担っている。

一方、大学においては1965年に北海道大学で加来照俊教授が路面のすべり抵抗に関する研究を開始したのが最初であり、実測車による測定を中心に冬季路面のすべり抵抗に関する研究を展開してきた。また、加来教授と共同で骨材の研磨(polishing)に関する研究を行った室蘭工業大学の斎藤和夫教授はペンシルベニア州立大学の客員教授として Meyer 教授、Henry 教授、James Wambold 教授らと共同研究を行い、日本人で初の ASTM E-17 会員として、また PIARC TC-1 の専門委員として Henry 教授らと共に国際的な舞台で研究活動を行っている。

1・2・3 アメリカ材料試験協会 (ASTM) におけるすべり抵抗の研究の経過

ASTMは1898年6月16日に設立され、1998年で100周年を迎えた。先ず、A-1の Steel, Stenless Steel and Related Alloys から始まり、現在F-32まで132の

Committees と 10,000 のスタンダードがある。すべりについて規格化は 1960 年に E-17 において活動が開始された。この委員会 (E-17) は本来すべり抵抗を研究する委員会で、1958 年に開催された第 1 回国際すべり防止会議がその発端である。1960 年にこの委員会は “E-17 on Skid Resistance” と名付け、活動範囲を下記の 3 点に決めている。

- (1) 野外や研究室での路面のすべり摩擦を決めるための測定法を開発し、その規格化を図る
- (2) 路面のすべりの規格を出すのに用いる試験法を開発し、規格化する
- (3) 上記の目的を確立するための研究を進める

1979 年には “E-17 on Surface Characteristics” と変更して、活動範囲を路面や交通路面の摩擦と表面の粗さを決めるための調査の遂行、知識の普及、原理や技術や規格を開発とする。さらに、1988 年には “E-17 on Pavement Management Technologies” と変えて、活動範囲を路面管理技術のための調査遂行、知識の普及、原理や技術や規格を開発するものへ、さらには 1998 年には、“E-17 on Vehicle / Pavement System” と名付け活動範囲を舗装管理技術、車両と舗装の相互作用、車輻と高速道路システムの相互理解をするための調査の遂行、知識の普及、原理や技術や規格を開発するものへと、その時代の要請に応じて活動範囲を広げてきている。

1・2・4 常設国際道路協議会 (PIARC) における研究の経緯

PIARC とは The Permanent International Association of Road Congress の頭文字を取ったもので「常設国際道路協議会」(現在は世界道路会議: World Road Association と呼ばれている)、1909 年に設立されている。道路、道路建設技術、道路景観等に関する最も歴史のある権威ある国際機関で、日本を含め世界約 64 ヶ国が加盟しており、12 の技術委員会 (Technical Committee) と 3 つのワーキンググループがあり、各技術委員会は 1 年に 1 ないし 2 回の会議をもち、4 年に 1 回国際道路会議を開催している。1992 年に、Technical Committee (TC-1) はスペイン

とベルギーで今世紀初の価値ある路面性状とすべり抵抗測定の実験を行ったが、この共同実験に本研究で開発したポータブルすべり抵抗測定装置が参加し、多くの貴重なデータと成果を得た。

1・3 すべり抵抗の性質

一般に、タイヤが路面に接して運動している場合、車両はタイヤの接触面でなんらかの抵抗を受ける。タイヤが自由に回転している場合の抵抗がころがり抵抗（ころがり摩擦）であり、タイヤがすべっている状態の抵抗がすべり抵抗(skid resistance)である。タイヤのすべり抵抗は主としてタイヤと路面間のすべり摩擦の他にタイヤのトレッド面と路面の凹凸のための変形によるエネルギー損失による抵抗、トレッド模様と路面の凹凸のかみ合わせ、および路面突起物がタイヤを切り裂くような抵抗がある。しかし、タイヤのすべり抵抗の大部分を構成するのはすべり摩擦であり、すべり抵抗を荷重と抵抗係数に分けて考える場合、この抵抗係数は摩擦係数とほとんど同様の性格のものとなる。

すべり抵抗は基本的にはタイヤ（材質、トレッドパターン、摩耗）、路面（ミクロとマクロな粗さ(microtexture and macrotexture)）および運転パラメータ（速度、ブレーキ操作）の相互作用によって決定される。また、タイヤと路面間に介在する物質（よごれ）の量が多くなるほどすべり抵抗は低下する。冬季に路面が雪氷で覆われると、路面それ自体はすべり抵抗に寄与しなくなる。これはタイヤと路面間に油やダスト等の汚れがある場合にも同様になる。これらのケースについては路面のすべり特性を別に考えなければならない。

一般に、すべり抵抗の問題が生じるのは湿潤路面において、タイヤと路面間に薄い水膜(water film)が存在する場合である。舗装路面における骨材（路面の粗さ）の役割は、

- 1) 水膜を切り、タイヤと路面間の接触面(dry contact area)を確保する
- 2) 路面の排水をする

ことにある。1)の役目は路面のミクロテクスチャー、2)の役目は路面のマクロテクスチャーに依存し、舗装の表層配合の粒度と表面処理に関係する。路面が新しい間は骨材がこの役割を果たすが、交通の作用によるポリッシングにより路面が摩耗したり、骨材がはぎ取られたり埋め込まれたりするにつれて、路面のテクスチャーの役割が低下して、タイヤのトレッドだけが排水に寄与することになる。このような状態では高速でタイヤと路面との接触部をなくし、水膜上でスリップし、いわゆるハイドロプレーニング(hydroplaning)現象の発生する危険性が增大する。

すべり抵抗を考える場合は路面の特性のみに限定すべきではない。タイヤと路面間のすべり抵抗はタイヤの状態、車両速度、水膜厚、温度等多くの要因に依存している。しかし、そのいくつかはまだ定量化されていないのが現状である。

1・4 すべり抵抗の測定方法

1・4・1 すべり抵抗の測定の目的

湿潤路面上のタイヤと路面のすべり抵抗測定とすべり抵抗の改善は、一方で路面の特性を、他方でタイヤの特性を別々に測定する試験方法と装置が必要となる。また、基本的には3つのパラメータである路面、タイヤと車両の相互作用を測定し評価する方法も必要であり、調査の目的に応じて測定方法と装置が選択されることになる。

道路建設の側では、道路の使用後におけるすべり抵抗の水準と交通条件等の変化によるすべり抵抗の変化を評価することに関心があり、自動車製作の側では車の方向制御特性に及ぼすタイヤと路面間の摩擦の影響に関心があるため、車の操縦性を検査できるような試験車で路上試験することになる。試験は対象とする路面上でタイヤと路面間の摩擦と同様にタイヤと車の相互作用を把握するためにタイヤ技術者によって行われる。多くの基礎的な調査はドラム試験機によって行われている。基礎的な研究においては、測定装置がタイヤと路面間の複雑なプロセスを調査するために使われるので、一般に装置は精密で高価であり、縦方向と横方向の摩擦状態のすべての組み合わせ

せを調査することが必要である。

舗装設計に関する研究では、測定のひとつが単一の規定されたパラメータに限定されるが、異なる速度で望ましくは実物サイズのタイヤ(full-scale tire)で行われる必要がある。道路の維持管理のためには、通常の測定はすべての主要な道路で行われなければならないので、効率的な測定装置が望まれる。

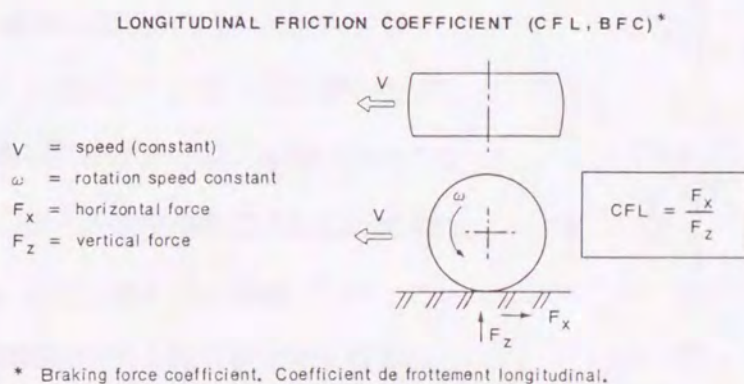
このように、すべり抵抗の測定方法と装置はその目的によって異なることになるが、ここでは道路の設計と維持管理の分野において利用されるすべり抵抗の測定方法について示す。

1・4・2 すべり抵抗の測定方法

車が速度 V で走行している時、タイヤに制動力を加えるとタイヤの接地面に進行方向と反対方向に摩擦抵抗力 (F) が生じる。この摩擦抵抗力とタイヤに掛かる荷重 (W) の比をすべり摩擦係数(skidding friction coefficient)という。このすべり摩擦係数はこの原理によって測定されるが、測定方法には次の3種類がある。

(1) 縦すべり摩擦係数

タイヤが車両の進行方向と同一方向に回転している時にタイヤに制動力を加えると、制動力が十分に大きい場合は、車輪(タイヤ)が完全にロックされた状態になり、路面に対するタイヤ表面のスリップ率は100%となる。このときのすべり摩擦力とタイヤ荷重の比を縦すべり摩擦係数(longitudinal friction coefficient)という(図—1・3)。



図—1・3 縦すべり摩擦係数の測定原理

この測定原理によるすべり抵抗の測定方式を車輪ロック方式(locked-wheel braking mode)という。この方式では車輪は完全にロックする状態まで繰り返し制動がかけられ、タイヤと路面の接触面のオーバーストレスまたはオーバーヒーティングを防止する範囲でロックが解除される。車輪ロック方式はアメリカを中心に使用されているが、連続測定ができないという欠点がある。

(2) スリップ率のある縦すべり摩擦係数

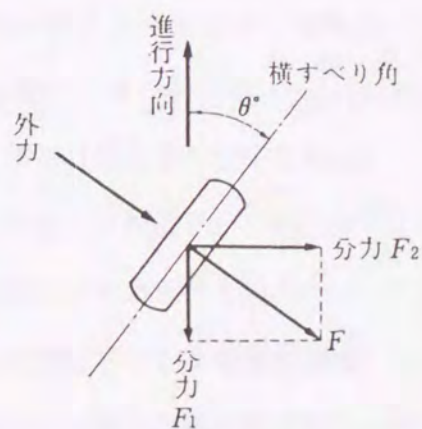
タイヤが自由に路面上をころがっている場合、スリップ率は0%であり、完全ロックされた時のスリップ率は100%である。普通の制動状態ではスリップ率は0~100%の中間状態にある。一般に、走行車両の対路面速度とタイヤの回転速度に差がある場合をスリップ率のあるすべり摩擦状態というが、スリップ率は次式で表される。

$$\text{すべり率} = \frac{\text{車両の対路面速度} - \text{タイヤの回転速度}}{\text{車両の対路面速度}}$$

縦すべり摩擦はこの測定原理に基づいて測定することができる。これをスリップ方式(slip mode)という。スリップ方式は車輪があるスリップ状態におけるすべり抵抗を測定するもので、不均一なタイヤ摩耗の防止と連続的な測定が可能である。一般にスリップ率および速度を固定して測定するが、スリップ率を連続的に変化させて測定する装置もある。

(3) 横すべり摩擦係数

タイヤが車両の進行方向と同一方向に自由に回転している時に、タイヤ面に直角方向の外力が働いてタイヤを横に移動させようとする、タイヤの接地面でこれに抵抗する力が働く。これを横すべり摩擦といい、この横すべり摩擦抵抗力と輪荷重の比を横すべり摩擦係数(lateral friction coefficient)という。



図一・4 横すべり摩擦係数

実際には、横すべり摩擦係数はタイヤを進行方向に対して一定の角度で傾けたコーナリング状態で測定される。これは車両が曲線部を走行している場合に相当するもので、車輪には遠心力による横方向に力が働き、これに抵抗してタイヤの接地面に横すべり抵抗力(sideway force)が働く状態である(図-1. 4)。

タイヤの回転方向と進行方向に θ の横すべり角度(slip angle)をなしている場合の横すべり摩擦係数を測定するが、この原理に基づく測定方式をサイドフォース方式(side force mode)と呼ぶ。サイドフォース方式は曲線部などのコーナリング状態に対するすべり抵抗(横すべり抵抗)を測定することを目的としており、ヨーロッパを中心に使用されている。

1・4・3 すべり抵抗測定における課題

すべり抵抗の測定方法は上述のように、大きく分けると車輪ロック方式、スリップ方式および横すべり方式(サイドフォース方式)による各種の測定装置が各国で使用されている。それぞれの測定方式および装置にはいくつかの課題がある。

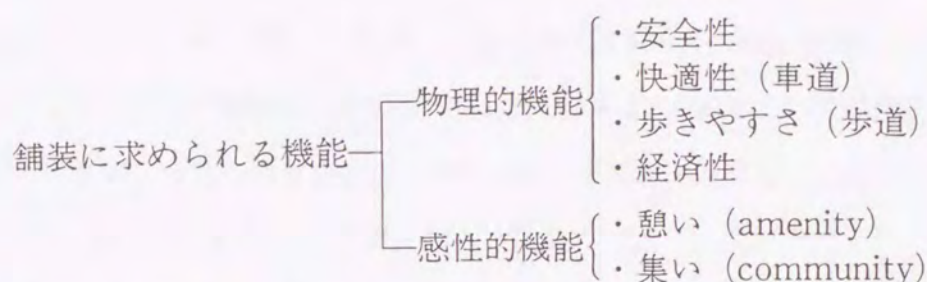
第1の課題は全体として共通している問題は測定装置(測定車)がバスタイプや大型車牽引式等の実物大の大型であり、初期投資と維持(測定)費用が高いことである。このため、より簡便な小型化(ポータブル化)した性能の良いすべり測定装置の開発が世界的な課題となっている。

第2の課題は、路面のすべり抵抗は車両の走行速度により変化する速度依存性(speed-dependency)がある。この速度依存性は路面のテクスチャー(粗さ、texture)による排水能力が密接に関係してくる。したがって、すべり抵抗を測定する場合には、速度の変化によるすべり抵抗の変化を同時に測定できることが望ましいが、世界的に実用的な装置がないのが現状であり、新しい装置の開発が求められている。

第3の課題は、路面のすべり抵抗やテクスチャーを測定する方式や装置は国によって異なっていることである。このため、各国で測定された値を直接比較することが困難であり、国際的に統一した舗装マネジメント方法の確立を困難にしているため、世

界の異なる方式と装置によるすべり抵抗測定値を比較し、相互の相関関係を明らかにするとともに、測定値を基準化する(harmonize)方法の開発と規格化が求められている。

第4の課題は、これら世界的な動向とは別に、高齢化社会の進展等に伴い人にやさしい環境の創造に対応する舗装機能が求められてきている。それらの機能は次のように整理することができる。



このうち、特に人が安全で歩き易い機能を考える場合に、歩道や建造物の床材等、舗装表面の凹凸や舗装材のすべりが問題となる。しかし、これら舗装材表面のすべり抵抗は静止状態から歩行速度までの低速範囲で測定できることが必要であるが、これまで開発された測定装置は室内実験を目的とした物が多く、実際の現場で測定できる装置の開発が求められている。

1・5 本研究の目的と内容

本論文では前項で示した4つの課題に対応した新しいすべり抵抗測定装置の開発とその利用に関する研究を行うことを基本的な目的としているが、具体的には次の3つの目的に対する研究成果をまとめたものである。

本研究の第1の目的は、前項の課題の1と2に対応して、ポータブルであり、すべり抵抗の速度依存性を測定でき、かつ測定の個人差がなく、簡便で誰でも使用できしかも再現性がある測定装置の開発を目的としている。

現在、世界的に使用されている測定装置はバスタイプ、牽引式等大型が多い。ポータブルなものとしてはイギリスの道路研究所が開発した振り子式テスター(British

Pendulum Tester: BPT)が有るだけである。このテスターは簡便であるが、測定者による個人差が測定値に現れることや、速度の変化に対応できないという難点もある。現在の自動車のスピード化を考慮すると、速度依存性があり、しかもポータブルな測定装置の開発が望まれている。

そこで、本研究で新たに回転盤方式を採用したユニークな動的すべり抵抗測定装置 (Dynamic Friction Tester:以下ではDFテスターと呼ぶ)を開発してこの課題に対応しようとするものである。開発されたDFテスターは国内外の特許を有するとともに、1998年には日本で開発された装置で初めて ASTM Standard として規格化された。本論文の第2章ではこの開発されたDFテスターの測定メカニズムと特徴、有効性の検討結果、および ASTM Standard の内容をまとめている。

本研究の第2の目的は、前項の課題3に対応して、国際機関の実施した国際共同実験に参加して得たデータベースに基づいたすべり測定装置の国際比較を行うとともに、共同実験で開発された国際摩擦指標の推定方法について検討することを目的として、新しく開発されたポータブルすべり抵抗測定装置の利用に関する研究を行っている。

世界道路協会 (PIARC) の路面特性に関する技術委員会 (Technical Committee 1, TC-1) ではこの課題3に対応するため、世界各国の異なる方式および測定装置による測定結果を比較する方法を開発する目的で、1992年9月と10月にベルギーとスペインで各々1ヶ月にわたる国際共同実験を実施し、世界で初めての大規模かつ詳細なデータベースが作成された。開発されたDFテスターはこの共同実験に参加して貴重なデータを得たが、PIARC ではこのデータベースを利用して各国が解析を行いこの課題に対応することを要請している。

本研究ではこの要請に対応して、国際共同実験で作成されたデータベースを用いて参加した15カ国から37種類のすべり抵抗測定装置による測定値の相互比較を行い、開発されたDFテスターと他の装置間の関係式および相関係数を把握した。この結果を論文の第3章にまとめている。また、国際共同実験では異なる方法と装置による各測定値を共通の値に換算するためのPIARCモデルを開発し、基準化する指標とし

て国際摩擦指標(International Friction Index: I F I)を提案した。本研究ではこの提案された I F I を D F テスターの測定値から算定する方法を検討し、D F テスターは極めて有用な測定装置であることを明らかにした。さらに、新しく開発されたテクスチャー測定装置(Circular Texture Meter:以下では C T メータと呼ぶ)と組合せて I F I を算出する方法を提案し、推定された I F I を舗装のマネジメントに利用する方法を提案した。これらの成果は本論文の第 4 章にまとめている。

なお、この国際共同実験で開発された I F I は 1 9 9 8 年にこの指標は A S T M Standard として規格化され、D F テスターを用いて I F I を算出する装置固有の係数が与えられている。この結果、開発された D F テスターはわが国で唯一の I F I を算出できるすべり測定装置となった。規格化された A S T M Standard の中で、D F テスターの利用方法が特記事項として取り扱われており、その有用性が世界に公表された。

本研究の第 3 の目的は、課題 4 に対応した歩道等のすべり抵抗を現場で測定可能な新しいポータブルな装置を開発し、その利用に関する研究を行うことである。そこで、舗装路面だけでなく、建築物の床材等の安全な歩行路面のすべり抵抗を測定できるポータブルで簡便な測定装置として D F テスターを改良した S タイプを開発した。この装置は動的摩擦と静的摩擦の両方を測定でき、かつこれまでの装置が室内実験のみに限定されていたものを室内および現場で測定可能なものである。この装置の測定メカニズム等は第 2 章で、実際の利用についての研究成果は第 5 章にまとめられている。

本論文の第 1 章は総論であり、第 6 章は論文の結論である。よって、本論文は「舗装路面のポータブルすべり抵抗測定装置の開発と利用に関する研究」と題して、研究成果を 6 章構成でまとめたものである。

参考文献

- 1) 土木学会：舗装工学、丸善、平成7年、pp.27.
- 2) 川村 彰：研究討論会「路面は語る」－路面は安全性、乗心地、景観などにどのような役割を果たしているか？－、土木学会誌、Vol.84,jan. 1999.1、pp.137-139.
- 3) ROAD TRANSPORT RESEARCH：OECD、1984
- 4) ARRB TRANSPORT RESEARCH：Research Report ARR 311、1997
- 5) 田中久一郎：「摩擦のおはなし」、日本規格協会、1995年
- 6) 會田範宗：「摩擦の話」、岩波書店、1974年
- 7) Jim C. Wambold, Charles E. Antle, Jhon J. Henry and Zolten Rado：International PIARC Experiment To Compare And Harmonize Texture And Skid Resistance Measurement, PIARC, 1995.
- 8) ASTM Standardization News, January 1998
- 9) 島田八郎：「路面の縦断及横滑り摩擦抵抗に及ぼす路面種別と其の性状との影響に就いて(第1報)」土木試験所報告 第四十号
- 10) 市原薫：路面のすべり抵抗に関する研究(1)、土木研究報告134号の3
1969年2月
- 11) 市原薫、越正毅、小野田光之：「路面のすべり」技術書院
- 12) 市原薫、小野田光之：「路面のすべりとその対策」、技術書院、昭和61年

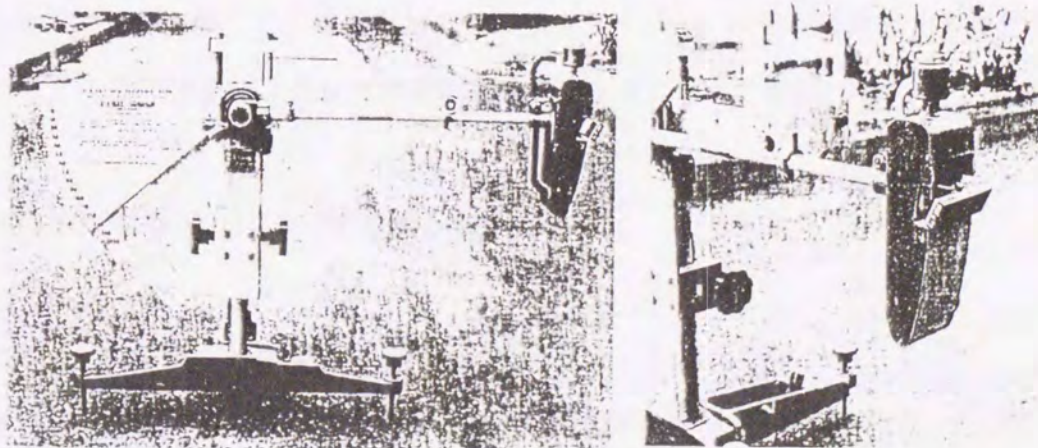
第2章 路面のポータブルすべり抵抗測定装置の開発と性能

2. 1 ポータブルなテスター開発の目的

既に1. 4. 3におけるすべり抵抗測定の課題で述べたごとく、測定装置（測定車）がバスタイプや大型車牽引第5輪測定方式の試験車や、ASTM型スキッドトレーラーなど大型のいわゆる実走行タイプの試験車が用いられてきている。これらの試験車は道路管理者や各試験研究機関によって一般公道やテストコースの摩擦係数を測定するために多く使われている。またタイヤの摩擦特性の測定だけに使用されることが多い。

これらの試験車は使用上簡便さを欠くこと、高額でありコスト高であること、測定用路面としてかなりの長さを要すること、1測点において1速度でしか測定できないため、すべり抵抗の速度依存性を調べるためには非常に多くの測定回数が必要であることなどから、より簡便で精度の高い測定装置の開発が求められてきている。

現在、世界で実用化されている唯一のポータブル装置として英国の道路研究所で数十年前に開発された British Pendulum Tester(BPT)がある。この装置は振り子の先端にゴムスライダーを装着し、ある高さから振り子を振り下ろして路面とゴムスライダーとの接触面におけるエネルギー損失程度（エネルギー保存の法則）からすべり抵抗を測定する簡便な測定装置（図2. 1）であり、広く世界的に使用されてきた。



図一2・1 British endulum Tester

しかし、路面とゴムスライダーの接触長の微妙な調整が測定値に影響することから、測定者による個人差があり、低速度領域におけるすべり抵抗値しか評価できないことから、速度依存性の測定が出来ないなどの難点がある。また、ASTM の規格 (ASTM E-1)¹⁾ では、BPT は実際のすべり抵抗を反映していないという評価をしている。

そこで、著者はこれらの問題点を解決するポータブルで簡便にすべり抵抗が測定でき、個人差がなく、再現性があり、かつすべり抵抗の速度依存性を表現できる測定装置の開発を試み、この目的に合致した測定装置の開発に成功した。この開発された測定装置は従来の振り子式測定原理とまったく異なる測定原理 (日本、西独 (当時)、米国の特許取得) に基づくもので、ダイナミック・フリクション・テスター (省略して DF テスター) という名称で製品化した。本章では DF テスターの測定原理、機構および装置の評価、および ASTM Standard の規格化について述べる。また、歩道や床舗装材などの歩行路面のすべり抵抗測定用に開発した DF テスターS タイの原理と構造についても示す。

2. 2 DF テスター (Dynamic Friction Tester) の原理と構造

2. 2. 1 DF テスターの測定原理

図一2・2においてタイヤゴム (ゴムスライダー) を W なる力で路面に押しつけ、 V なる速度で引っ張ると、タイヤゴム (ゴムスライダー) は F なる摩擦力を受ける。この力 F を測定すれば次式から摩擦係数を測定することができる。

$$\mu = F / W \quad (2 \cdot 1)$$

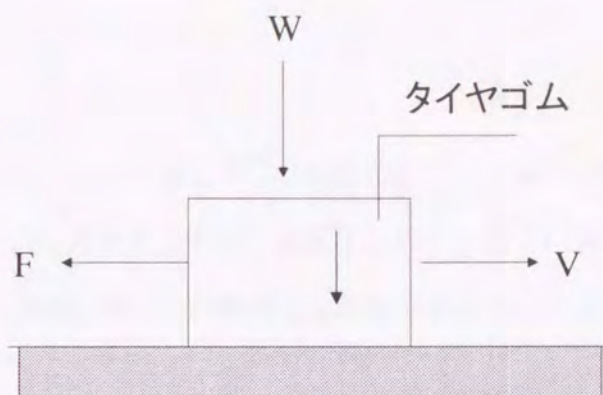
(1) 式において、 W を一定の値とすると、

$$\mu = K \cdot F \quad (2 \cdot 2)$$

となり、 μ と F は正比例する。(K は比例定数)

本装置では、この原理にもとづき、水平に回転する円盤にタイヤゴム (ゴムスライダー) を取り付け、これに一定の荷重 W を加え、このときタイヤゴム (ゴムスライダ

一)に加わる摩擦力 F と、そのときのタイヤゴム（ゴムスライダー）の線速度 V （円板の回転速度）を測定するようになっている。



図－２・２ DF テスターのすべり抵抗の測定原理

２．２．２ DF テスターの構造

本装置は、測定器本体とコントローラー及びX-Yレコーダー或いはコンピュータで構成されている。測定器の機構を図－２．３(a)と(b)に示す。図－２．３(a)は fly wheel（駆動円板）とゴムスライダー(rubber pad)の位置を、図－２．３(b)は装置の断面を示す。図－２．３(a)の fly wheel は駆動円板で大きい慣性を有しており、駆動モーター：によって回転を与えられる。fly wheel の下方には、同軸上に自由に回転できる慣性の小さい disk があり、この disk の下面には３個のゴムスライダーが取り付けられている。このゴムスライダーは roller（载荷用ベアリング）を介して本体の自重によって路面に押しつけられるようになっている。fly wheel（駆動円板）と disk（小円板）はゴムスライダーと同一円周上で spring balance（バネバランス）によって連結されている。ゴムスライダーに生じる力（摩擦力）によって、バネバランス：に変位が生じる。この変位は displacement meter（変位計）によって電氣量に変換される。この電氣量は、shaft（駆動軸）に取り付けられたスリップリングとブラシを経て外部

に取りだされる。ゴムスライダーの速度は fly wheel の回転速度として dynamometer (速度計発電機) によって出力される。

図一 2・4 はコントローラーの配置図を、図一 2・5 は D F テスターの電気系統図を示す。

2. 2. 3 DF テスターの遠心力 (Centrifugal Force) 対策

DF テスターは相当の回転数をもって測定するので、それに対する遠心力が常にかかる。DF テスターの測定時にかかる遠心加速度 α は次のようになる。

$$\alpha = \gamma \omega^2 = \gamma (2\pi n)^2$$

ここで、 $\omega = \text{rad/s}$

$v = \text{回転速度 (m/s)}$

$r = \text{半径 (m)}$

$n = \text{回転数 (r p s)}$

D F テスターで 80km/h の速度で測定する場合にかかる遠心力を計算すると、
 r は中心からゴムスライダー取付位置までの半径であり、 $r = 142\text{mm} = 0.142\text{m}$ 。
 n は 1500 r p m のとき、すなわち 80 km/h の時に、 $n = 25 \text{ r p s}$ となるので

$$\alpha_{80} = r \cdot (2\pi n)^2 = 0.142 \times (2\pi \times 25)^2 = 357.5 G$$

ゴムスライダー 1 ケの重さ : 75 g r であるので、速度 80km/h のとき、ゴムスライダー 1 ケに加わる遠心力 (F_{80}) は

$$F_{80} = 7.5 \times 357.5 = 2.68\text{kgf}$$

時速 90 km/h のとき、ゴムスライダー 1 ケに加わる遠心力 (F_{90}) は

$$\alpha_{90} = 452.5 G \text{ となるので、}$$

$$F_{90} = 7.5 \times 452.5 = 3.39\text{kgf}$$

これだけの遠心力が加わるため、これに耐えうる構造にした。また、変位計についても同様に考慮した。

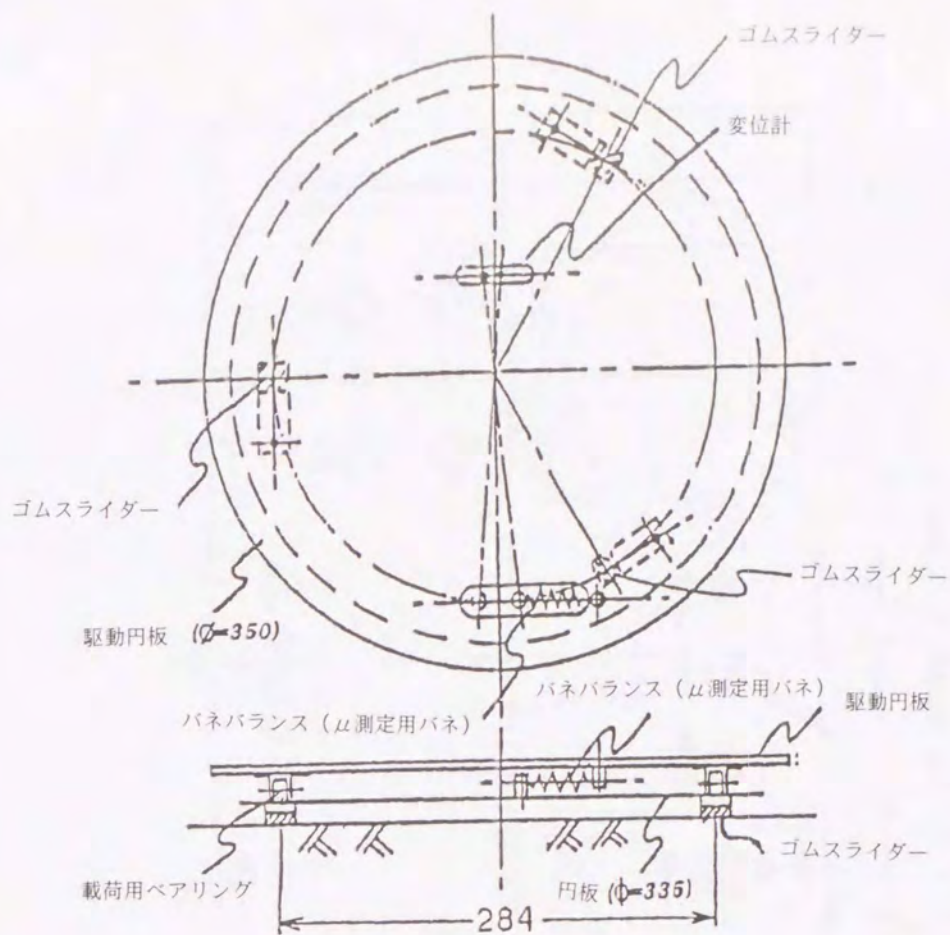


図-2・3 (a) DFテストの構造

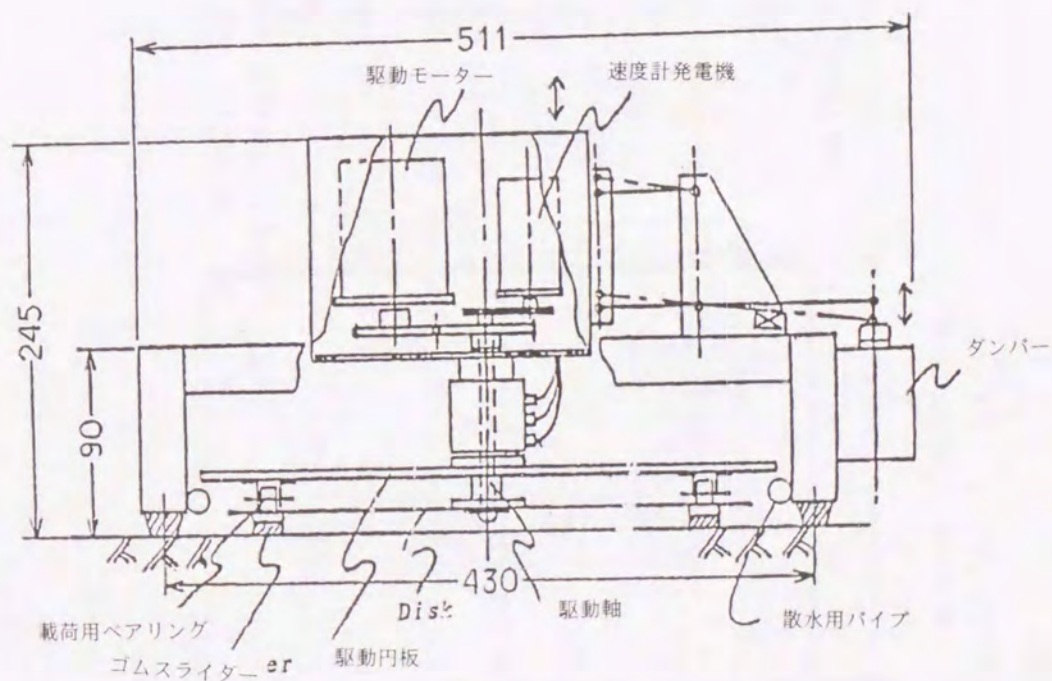
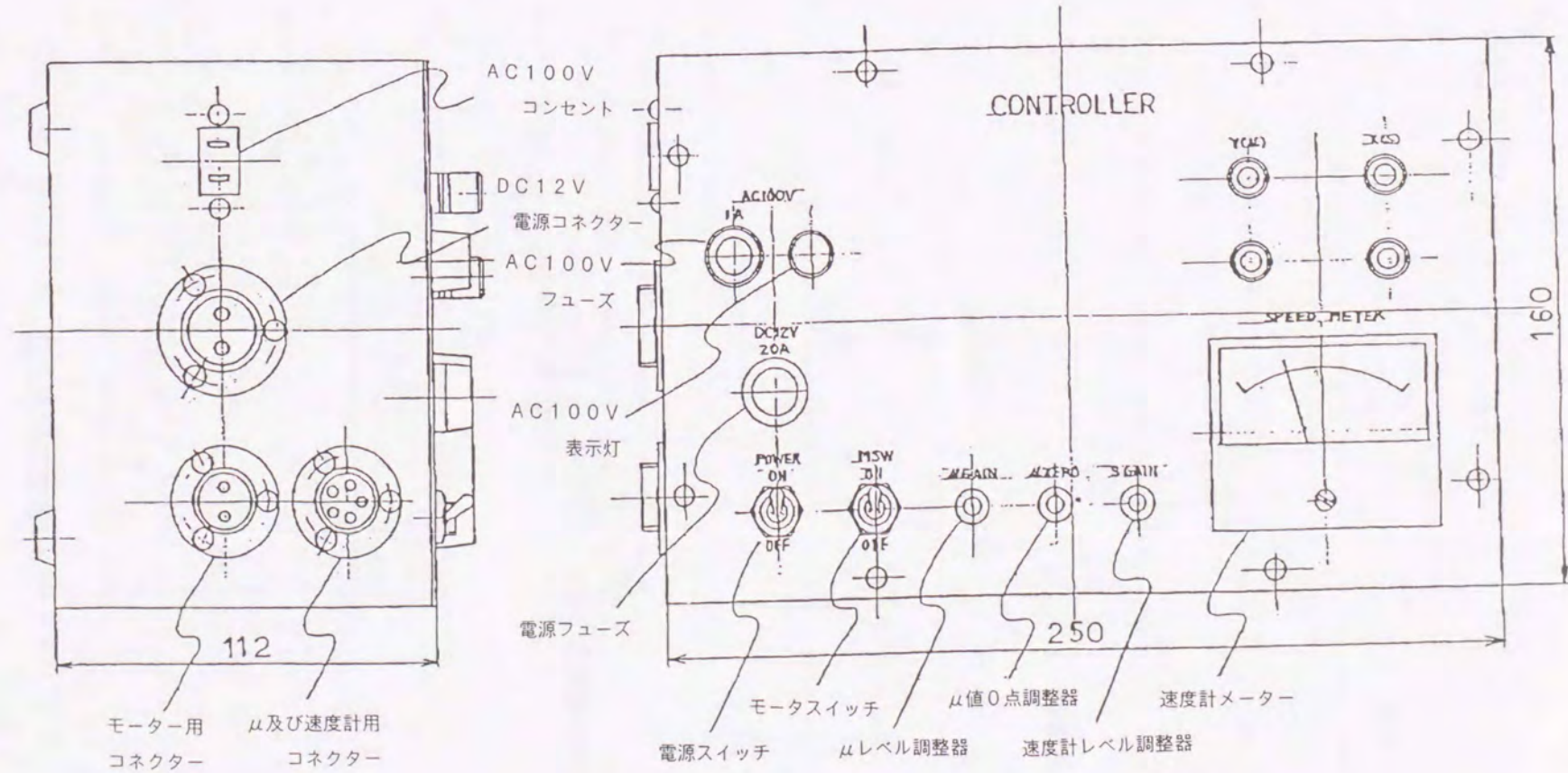


図-2・3 (b) DFテストの構造

コントローラー

24



図一 2・4 コントローラー配置図

コントロールユニット

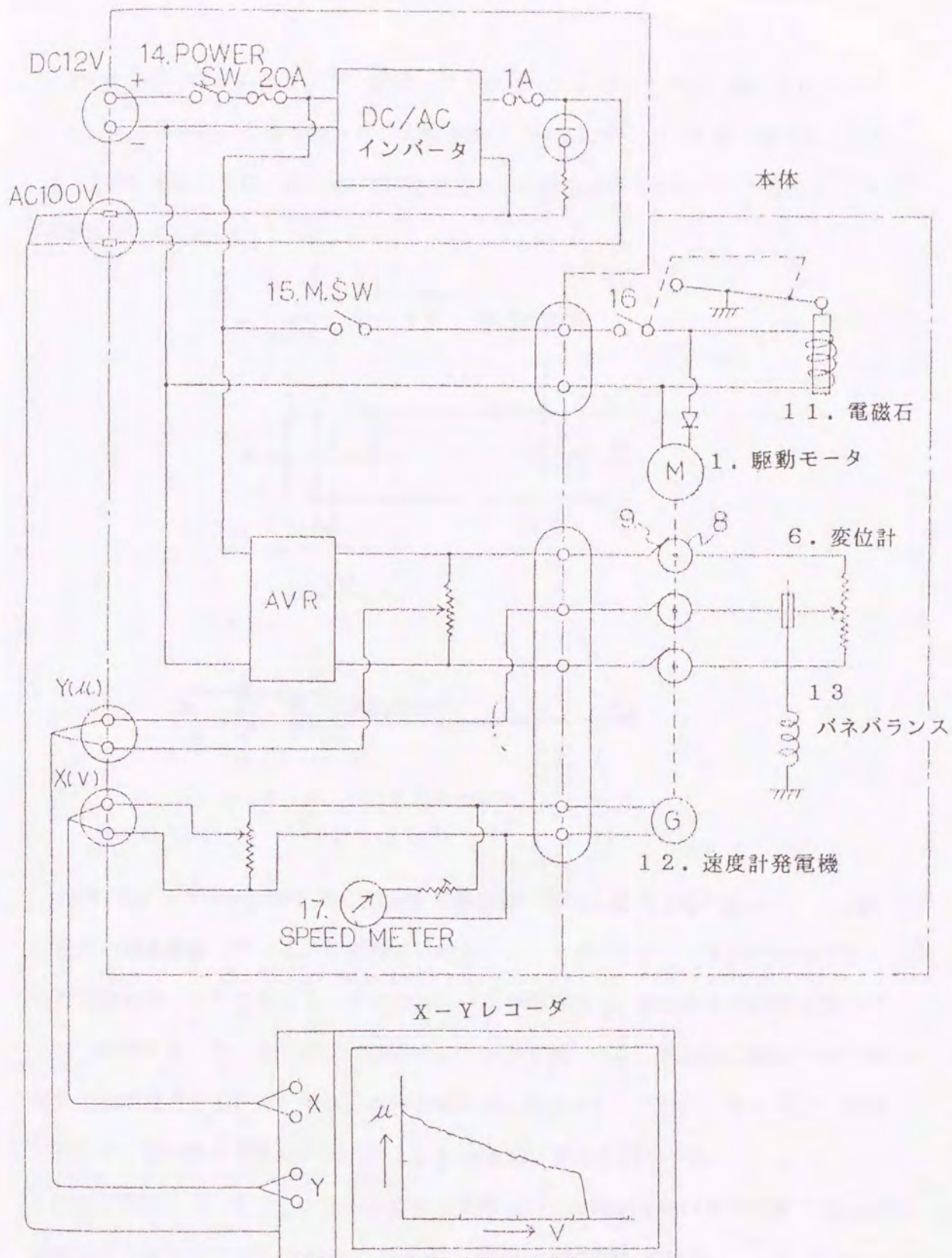
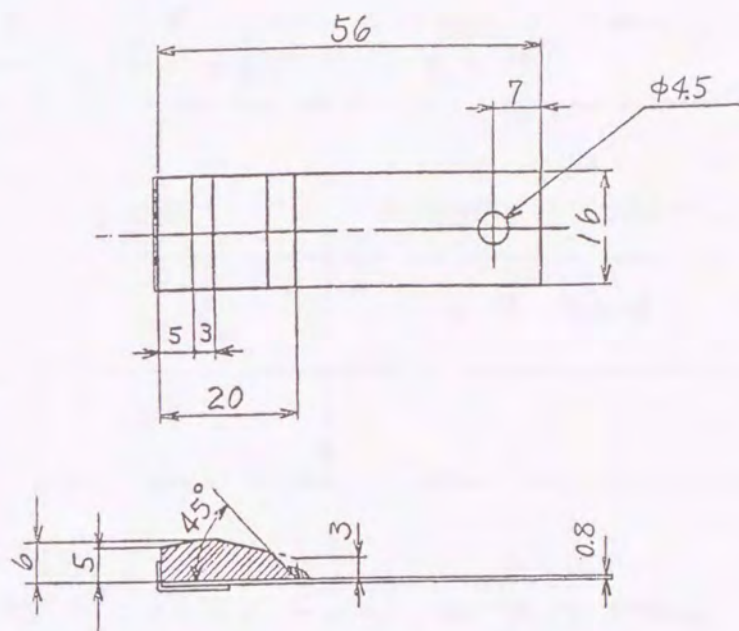


図-2・5 DFテスターの電気系統図

DF テスターのゴムスライダーは図—2・6に示すように、その寸法は6 mm×16 mm×20 mmの曲面を持ったゴムを金属プレートにボンドで接着させたものである。この形状は150 kPa の接地圧になるように設計されており、12回使用した後に取り替えるものとしている。



図—2・6 DF テスターゴムスライダー

通常、DF テスターは測定時に路面を湿潤状態に保つ。そのために図—2・7に示す散水装置を装備している。その構成は給水タンクと DF テスター本体の両側に取り付ける散水器、これを繋ぐホースおよびコック等からなる。給水タンクは測定用ライトバンの荷台等、地上より約1 mの高さにセットする。また、測定面は測定の前に清掃して水で濡らしておき、散水は本体を測定点にセットし、モーターのスイッチをオンにして、測定する速度のおおよそ10 km/h前で散水を開始する。

水は1分間に3.6リットルの率で散水するもので、路面における水膜厚さは測定速度が90 km/hに達した時点で1 mmになるように調整している。

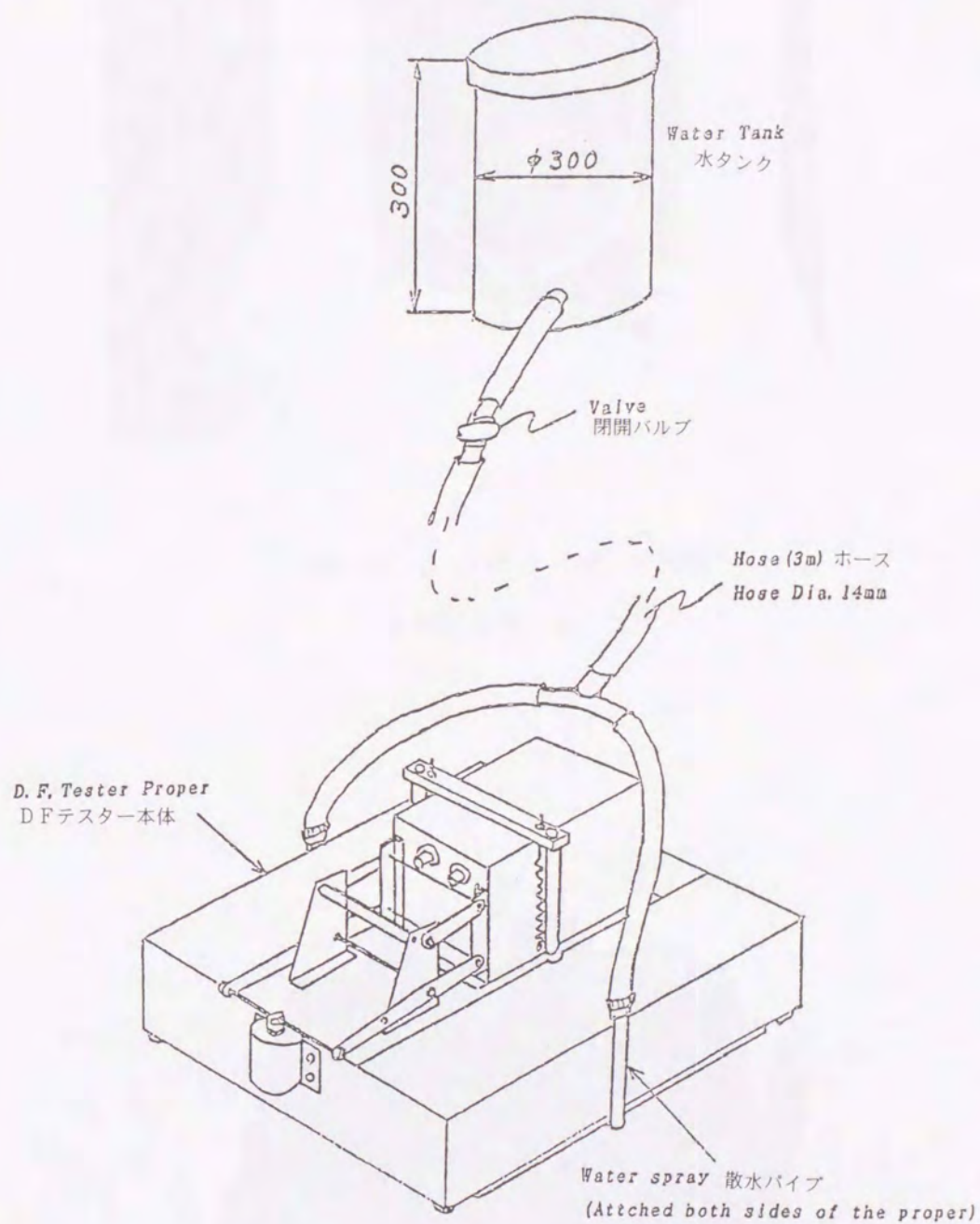
以上述べた DF テスターの仕様・諸元をまとめて表—2・1に示す。

表一 2・1 DF テスターの仕様・諸元

D. F. T. 本体の寸法	540 mm(d) X 590mm(w) X 380mm(h)
D. F. T. 本体の重量	16.8 kg(net)
コントローラ-、レコダ-の寸法	740 mm(d) X 630mm(w) X 160mm(h)
コントローラ-、レコダ-の重量	11 kg(net)
ゴムスライダ-の材質	ASTM標準タイヤコンパウンド
接地圧	1.5 kg/cm ² ~ 2kg/cm ²
電圧	12 V DC

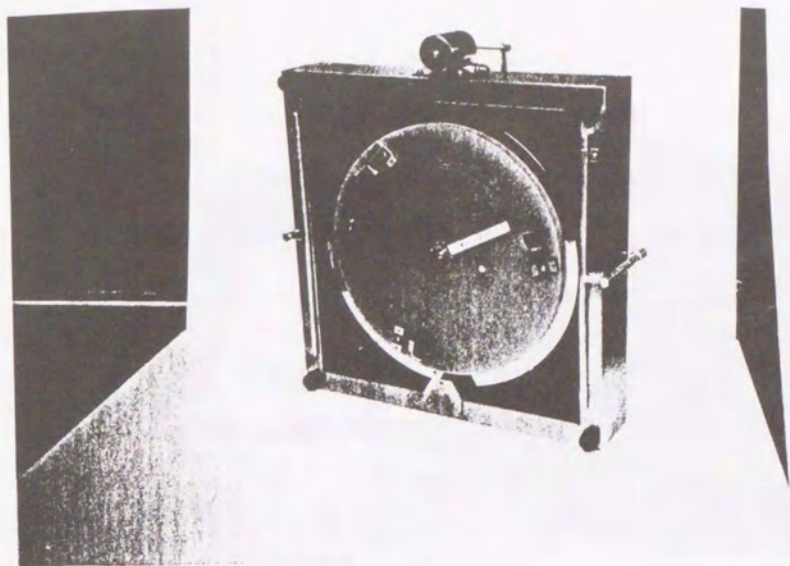
また、DF テスターのキャリブレーション方法についての詳細は 2. 4 節に示した ASTM 規格に規定されているので、ここでは省略する。

なお、写真一 2・1 から写真一 2・4 は DF テスターの概観、コントローラユニット、写真一 2・5 と写真一 2・6 は D F テスター測定例を示す。

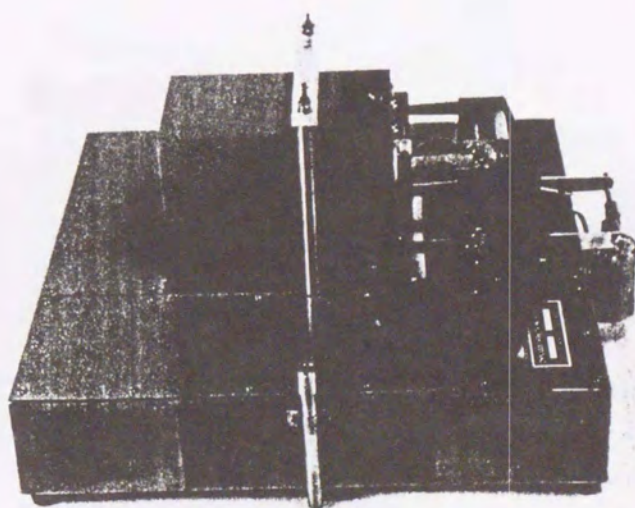


Tank must be placed 60cms higher than road surface. The amount of spraying water at the height is 60 cc/min.

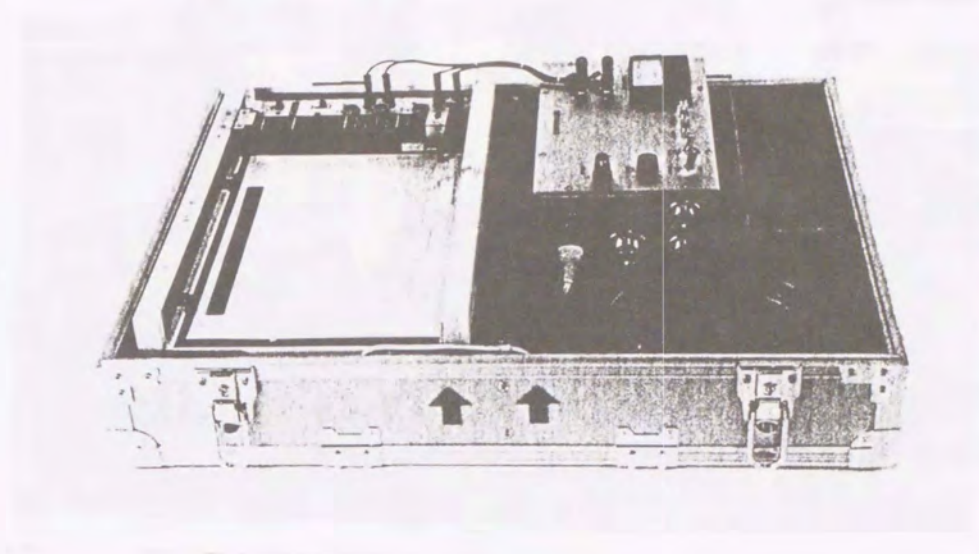
図一2・7 DF テスターの散水装置



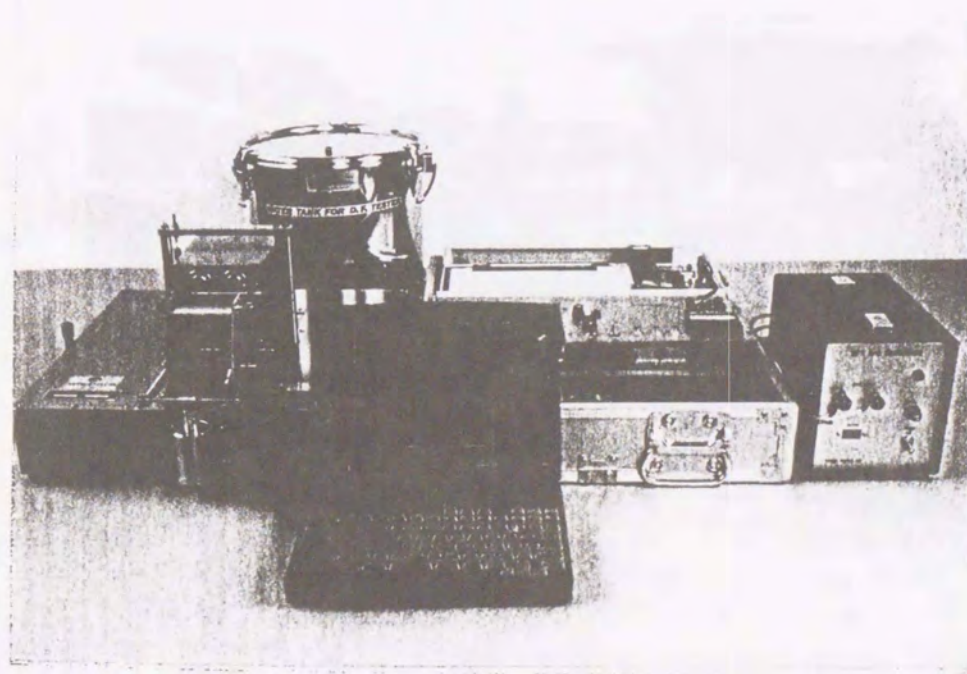
写真一 2・1 DF テスターの概観
(駆動円板とゴムスライダー)



写真一 2・2 DF テスターの概観



写真一2・3 コントローラーユニット



写真一2・4 DF テスター装置一式



写真—2・5 DFテスター測定例（米国NASA）



写真—2・6 DFテスター測定例（米国NASA）

2. 3 D F テスターの測定手順と特徴

2. 3. 1 D F テスターの測定手順

D F テスターの測定手順を図-2・6 に示す。最初に、路面にゴムスライダーを接触させないで disk (小円板) と fly wheel (駆動円板) を回転させる。回転が所定の速度 (最大約 90 km/h) に達した時点で回転円盤を下降させてゴムスライダーを測定路面に接触させると、fly wheel の回転速度は路面とゴムスライダーの間の摩擦によるエネルギー損失により低下していき、最後の回転が停止速度がゼロとなる。

摩擦力 F の変化はバネバランスの変位を電気エネルギーとして検出し、(2・1) 式から得られた摩擦係数を縦軸に、速度ダイナモメータから検出された速度を横軸にして X-Y レコーダに記録させる。この図の特徴はチャートの右側から記録が開始されて、速度の低下とともに摩擦係数の変化を左側へ記録し、最後に速度ゼロ時点で測定が終了する。また、コンピュータによる記録のモニター画面も出力できる。

D F テスターの最大の特徴はこの図に示されているように、1 回の測定で摩擦係数を連続的に測定できることである。この結果、摩擦係数と速度の変化を同時に測定

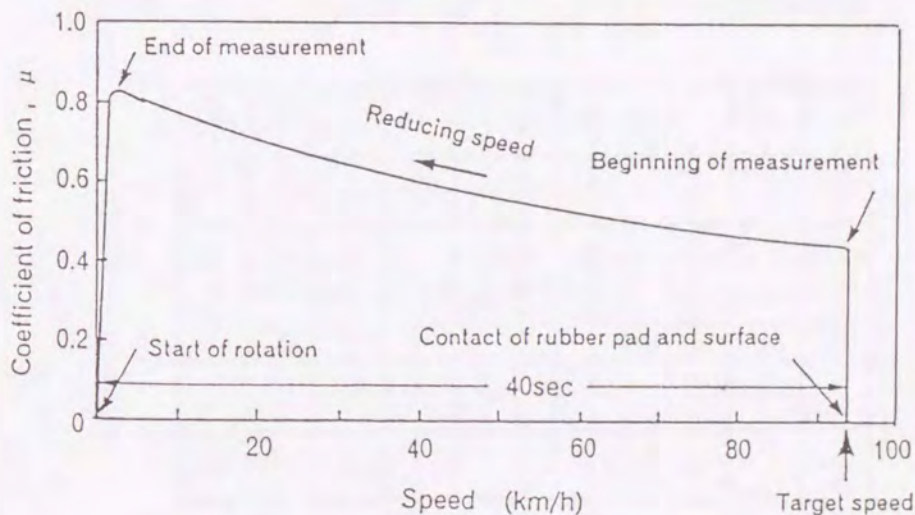


図-2. 6 D F テスターの測定手順

することにより、すべり抵抗と速度の関係（すべり抵抗の速度依存性）を容易に把握できる唯一の測定装置である。

2. 3. 2 DF テスターの速度依存性

前述した様に、自動車のめざましい発展により、自動車のスピード化が起こり、タイヤと路面とのすべりも複雑になってきているため、動摩擦測定装置としても速度依存性が求められてきている。図-2・8から図-2・11は各種路面におけるDF テスターの測定例を示し、写真-2・7はコンピュータ出力の例を示すものである。

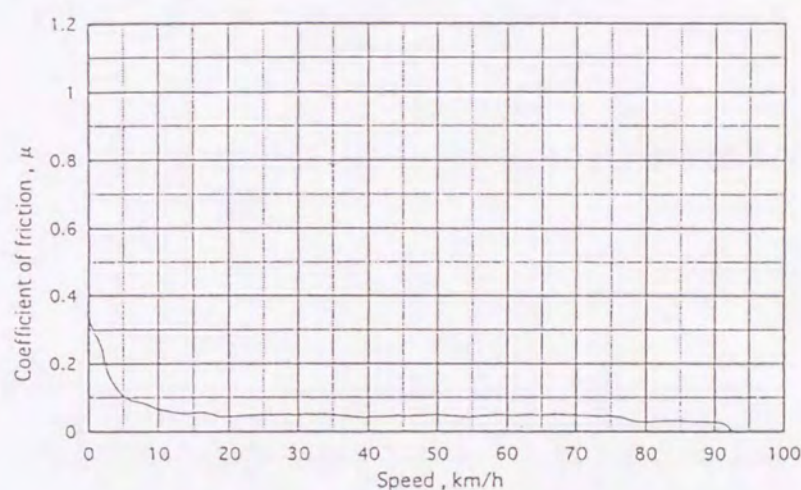


図-2. 8 アルミニウムプレートのすべり抵抗測定記録

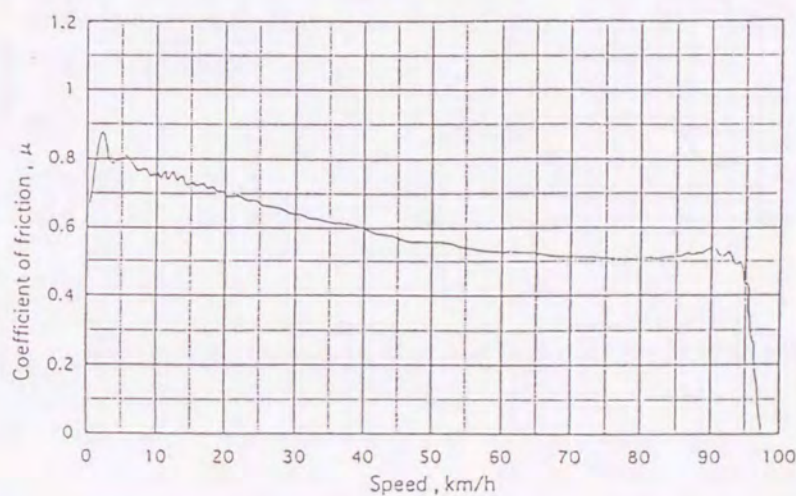
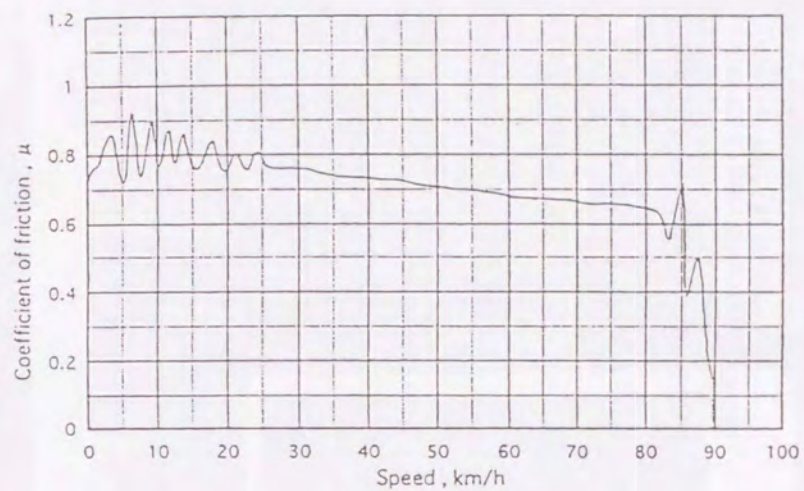
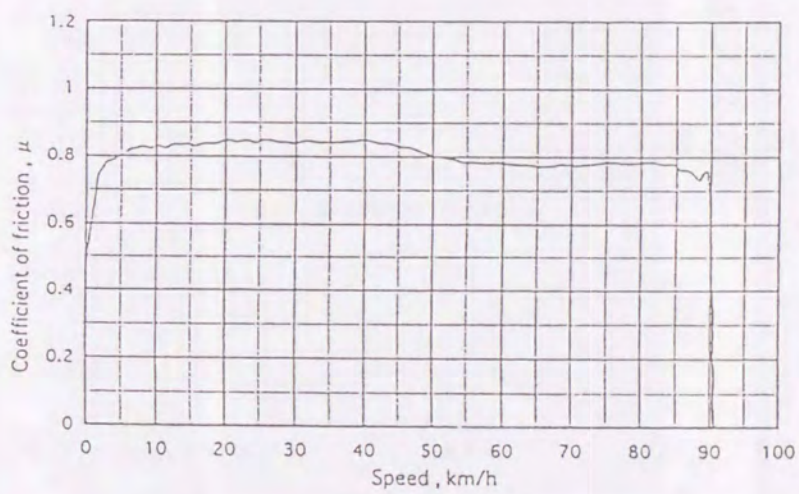


図-2. 9 密粒度アスファルトコンクリートのすべり抵抗測定記録



図一2. 10 セメントコンクリートのすべり抵抗測定記録



図一2. 11 密粒度アスファルト（グルーピング）のすべり抵抗測定記録

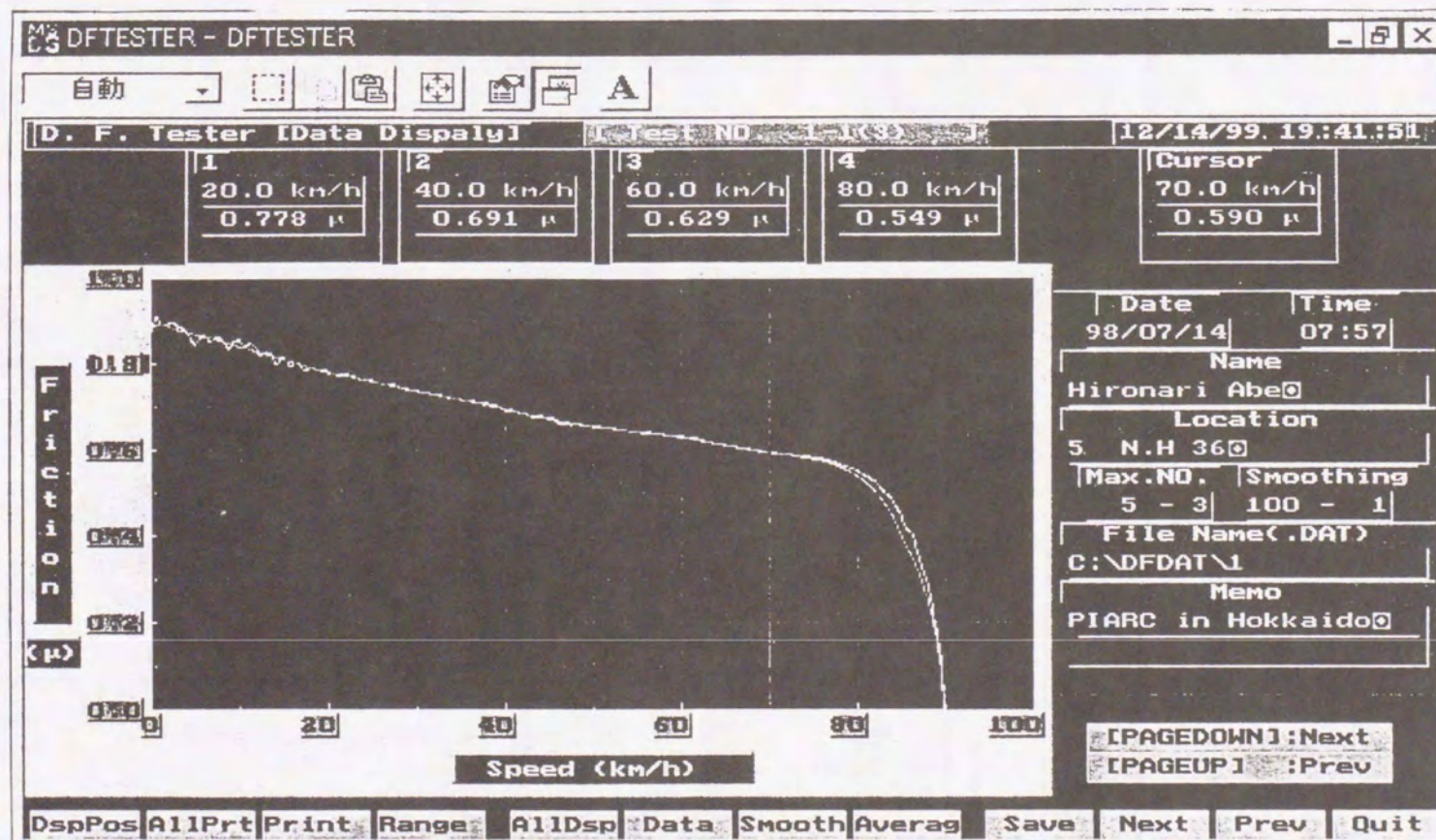


写真-2・7 DF テスターのコンピュータ出力結果

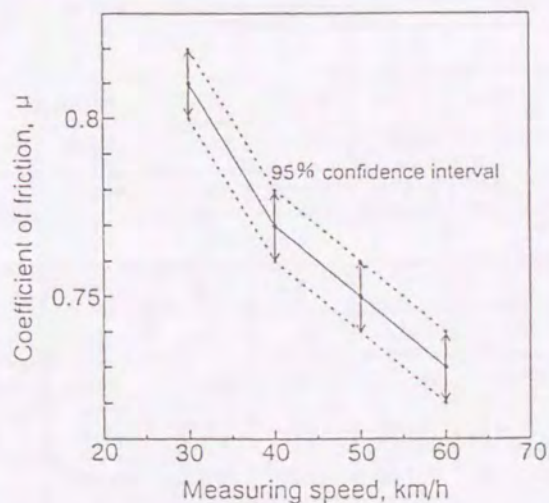
2・3・3 DF テスターの速度依存性測定の統計的評価

DF テスターの速度依存性を評価するために、北海道工業大学の構内に設置された試験道路（アスファルト舗装）について20～80 km/h の範囲で連続80回のすべり抵抗測定を行った。その結果を統計的にまとめて表一2・2に示す。

表一2・2 すべり抵抗測定結果のまとめ

VELOCITY	30	40	50	60
AVERAGE VALUE OF COEFF. OF FRICTION	0.81	0.77	0.75	0.73
STANDARD DEVIATION	0.0438	0.0421	0.0392	0.0380
VARIANCE	0.00191	0.00177	0.00153	0.00145
COEFFICIENT OF VARIATION (%)	5.40	5.50	5.20	5.20
95 % CONFIDENCE INTERVAL	0.82 - 0.80	0.78 - 0.76	0.76 - 0.74	0.74 - 0.72

この結果から、各測定速度におけるすべり抵抗の変動係数(coefficient of variation)は5・5%と小さく、測定結果は安定していることがわかる。また、図一2・12はこの結果を図に示したものである。この図からすべり抵抗は速度の増加とともに減少する様子が視覚的に理解でき、DF テスターはすべり抵抗の速度依存性を測定できることが統計的に示された。

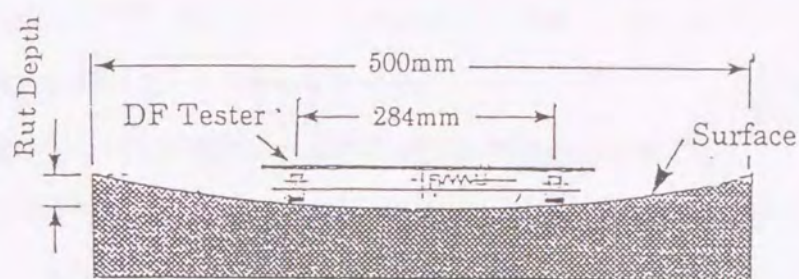


図一2・12 DF テスターの速度依存性測定の統計的評価

2・3・4 DF テスターのわだち（凹路面）における影響評価

一方、DF テスターは fly wheel（回転円板）によりすべり抵抗を測定するという機構上の特徴から、測定路面は平坦であることが望ましい。しかし、実際の路面では輪荷重などにより rutting（わだち）が生じている場合が多い。

そこで、わだちの深さが測定結果に及ぼす影響を評価するために、図—2・13に



図—2・13 わだち路面の実験断面

示すような断面のレジンコンクリート製のわだち深さ 0 mm、3 mm、6 mm、9 mm 4 種類の試験路面を作成し、すべり抵抗を測定した。その結果を表—2・3に示す。

表—2・3 わだち（凹路面）の影響に関する実験結果

VELOCITY	30 km/h				40 km/h			
RUT DEPTH (mm)	0	3	6	9	0	3	6	9
AVERAGE	.46	.49	.45	.41	.44	.46	.45	.39
STANDARD DEVIATION	.03767	.04386	.03441	.04740	.03372	.04213	.03018	.04190
COEFF. OF VAR. (%)	8.1	8.9	7.4	11.7	7.6	9.1	6.8	10.8
VARIANCE	.00142	.00192	.00118	.00225	.00114	.00178	.00091	.00176
SUM OF SQUARES	.02270	.03078	.01894	.03594	.01819	.02839	.01458	.02809
UNBIASED VARIANCE	.00151	.00205	.00126	.00240	.00121	.00189	.00097	.00187
VELOCITY	50 km/h				60 km/h			
RUT DEPTH (mm)	0	3	6	9	0	3	6	9
AVERAGE	.43	.45	.43	.38	.44	.44	.42	.38
STANDARD DEVIATION	.03557	.04330	.02952	.04299	.03969	.04684	.02657	.04330
COEFF. OF VAR. (%)	8.2	9.6	6.9	11.3	9.1	10.6	6.3	11.4
VARIANCE	.00127	.00188	.00087	.00185	.00158	.00219	.00071	.00188
SUM OF SQUARES	.02024	.03000	.01394	.02958	.02520	.03510	.01129	.03000
UNBIASED VARIANCE	.00135	.00200	.00093	.00197	.00168	.00234	.00075	.00200

各わだち深さの測定値の変動係数は6～12%で、9mmの深さで最高であった。各わだち深さ間の平均値の差の検定により、0mmの平均値と9mmの平均値の間で有意な差が見られたことから、DF テスターはわだち深さ6mm程度の範囲までは測定に大きな影響を与えないことが示された。

2. 3. 5 DF テスターの特徴

DF テスターの開発にあたって、その目標を次の通りとした。

- (1) 測定速度は0～80 km/h とする。
- (2) 装置は小型で軽量で、人の持ち運びが簡単にできること。
- (3) 路面に接するゴムスライダーの接地圧は、通常の乗用車ノタイヤと同程度とすること。
- (4) 測定は簡便に行うことができ、測定者による個人差が生じないような構造とすること。
- (5) 測定結果は自動的に記録できるようにし、摩擦係数（すべり抵抗係数）と速度の関係を直接読むことができること。
- (6) 電源は自動車のバッテリー（DC 12 V）を利用できること。

である。

そして、これらは本章で示したもののなど多くの調査研究によって実証され、DF テスターの特徴となった。その他に得られた特徴として、

- (7) 装置が小型で運搬に便利（ライトバンで運搬可）
- (8) 測定値の再現性が非常に良い
- (9) 測定値は直接摩擦係数を表し、換算の必要がない
- (10) 定時間が極めて短い
- (11) 路面が多少傾斜していても測定可能
- (12) 速度依存性がある
- (13) 電源は自動車のバッテリー（DC 12 V）でも、アダプター使用によりA

C 1 0 0 Vからでも可能

(14)テスト用のゴムスライダーの材質を変えることにより、その材質との摩擦係数を測定することが出来る

(15)1度の測定で0～80 km/hの間の摩擦係数が各速度で段階的にまた速度に応じて連続的にも測定が可能で、その結果がすぐグラフ化され、コンピュータで処理すればカーソルの移動で希望する速度の摩擦係数を瞬時に読める

2・4 DFテスターのASTM規格化

2・4・1 ASTM規格化まで経過

1987年6月10日から7月25日までの約1ヶ月半をかけて米国、カナダ、英国、ドイツ、スイス、オーストリア、イタリアのすべりの専門技術者を訪問して、試作したDFテスター装置の説明とデモを行い、この測定装置に対する意見を聞いた。その結果は非常に良い評価を受けた。また、1989年7月にペンシルバニア州立大学で2回目のデモンストレーションのため訪問し、この時には Prof. W. E. Meyer, J.J. Henry, James Wambold, Kulakowski の4教授に会い、同大学の道路テストコースで測定を行い、良い評価を受けた。

1989年12月にフロリダで開催された ASTM Meeting に初めて出席し、E-17-23 分科会でビデオにて Presentation を行った。1992年3月にベルリンで開催された PIARC、ASTM、TRB、FGVS 共催の第2回路面の特性に関する国際シンポジウム (Second International Symposium on Road Surface Characteristics) において、初めてDFテスターの測定原理と性能の概要を国際的に公表した。

1992年9月から2ヶ月間、PIARC 主催によるベルギー、スペインで実施されたテクスチャーとすべり抵抗の比較と調和に関する国際共同試験 (International PIARC Experiment To Compare and Harmonize Texture and Skid

Resistance Measurement)に参加し、今世紀最大規模の国際的共同実験の中で豊富なデータを収集し、その解析結果から DF テスターは国際摩擦指標の算出の有用な装置として認められた。この国際共同実験で得たデータの解析結果の詳細は本論の第3章で示している。また、国際共同実験で得られた結果のフォローアップを目的に米国 NASA の要請で 1993 年 5 月に NASA Langley Research Center で開催された共同実験セミナーに参加した。さらに 1994 年 5 月に “The First Annual Tire/Runway Friction Workshop at NASA Wallops Flight Facility” に参加、1999 年まで 6 年間続いて参加している。

これらの国際共同実験に参加した実績が評価され、1994 年に開催された ASTM June Meeting で DF テスターに関する Presentation を行うことが要請され、すべり抵抗測定装置の規格化を検討する分科会 (Subcommittee E-17-21) で New Business として DF テスターの規格化を検討することが決定された。

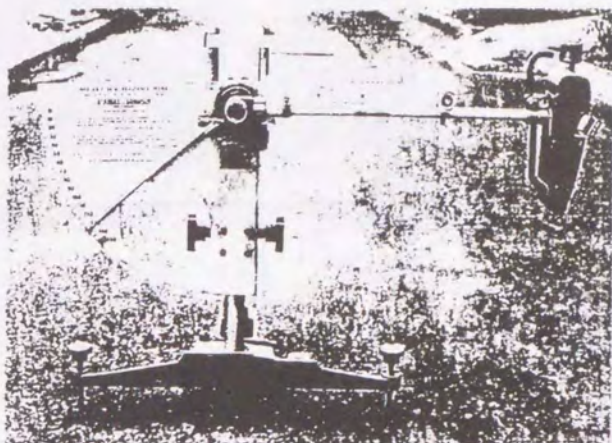
その後、本研究で得られたデータなどを背景として、規格化のドラフトを作成し、分科会で慎重に審議された結果、1997 年に E-17-21 分科会で投票が行われ、1998 年 12 月満場一致 (1 人でも反対者がいれば規格化されない) でパスし、DF テスターが E-1911-98 としてのスタンダードナンバーを取得した。

この ASTM 規格化への苦難の経緯は、当時建設省土木研究所の舗装研究室長池田拓哉氏 (故人) により道路専門誌 (舗装: 1998. 5・6 月号) に詳細に報告され、広く日本の道路舗装専門家に知られることとなった。

また、ASTM 規格化を機会に DF テスターが道路専門誌に多く紹介されるようになった。その紹介された 1 つの例を以下に示す。

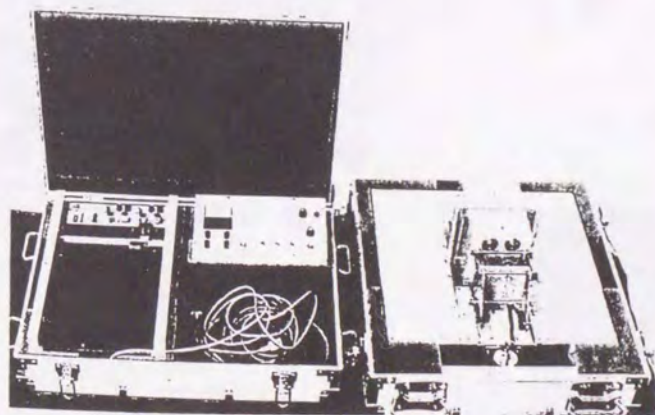
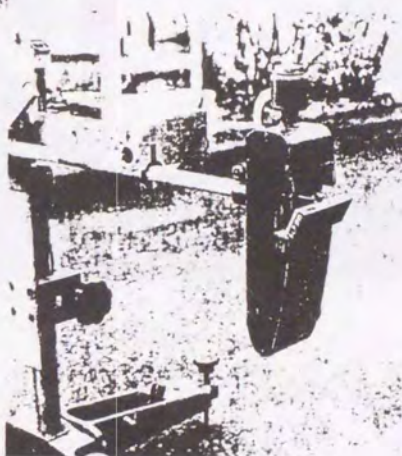
すべり抵抗測定機のいろいろ

先月号に引き続き、新しくASTM（アメリカの試験方法や材料の規格）に採用されたDFテスターを中心に、舗装路面のすべり抵抗測定機を紹介します。



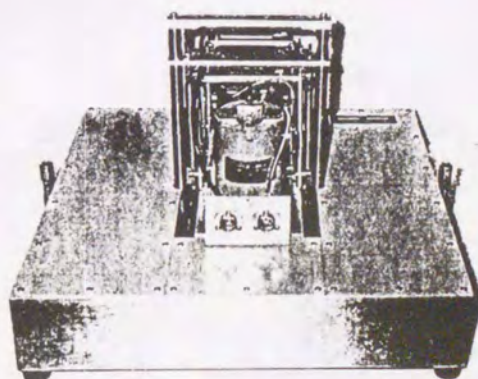
従来から用いられている振り子式スキッドレジスタンステスターです。写真は振り子を振り上げて固定した状態で、留め金をはすと振り子が自由落下し、左側に振り上がります。その振りの大きさを本体左側の針で記録します。

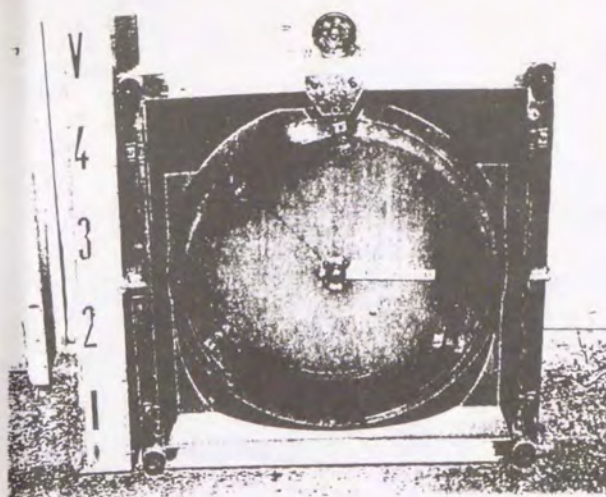
振り子の靴形の部分の拡大です。取り付けられているゴムは硬度等が規格（BS812、イギリスの規格）に適合したものです。振り降りるときの接地長さなど微妙な調整が必要で、それが測定誤差を生む原因になっています。



DFテスターの装置構成です。向かって左から、記録用のX-Yレコータ、制御装置（中央上）、接続ケーブル類（中央下）、計測機本体で、運搬用の専用ケースに入った状態です。

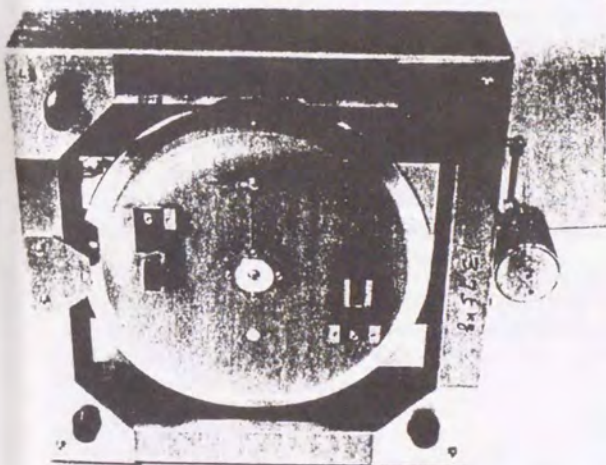
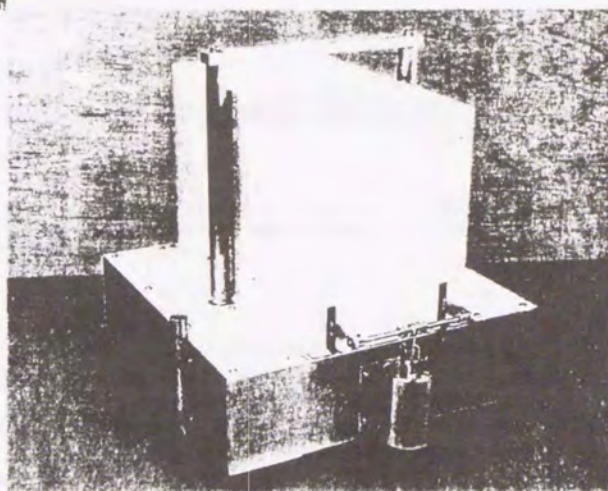
DFテスターのカバーをはすしたところです。





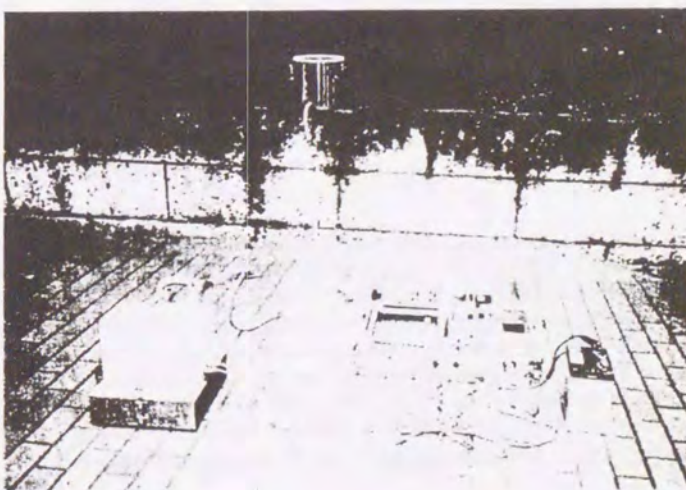
◀ 動摩擦係数測定用のDFテストの円盤です。すべり抵抗測定用のゴムスライダーが3個取り付けられています。

▶ 静摩擦係数および動摩擦係数（低速）測定用のDFテスト（Sタイプ）です。静止状態から回転を始めさせるためにモーターを大きくしたので、動摩擦係数測定用のDFテストより全高が高くなっています。



◀ DFテスト（Sタイプ）の円盤です。ゴムスライダーが2個になっています。

▶ DFテストを測定のためにセットした状態です。電源切れが心配される場合は、エンジンをかけたままの自動車から電源をとることもできます。路面に水を供給しながら（扉の上は水容器）すべり抵抗を測定します。



2. 4. 2 DFテスターのASTM規格⁸⁾

DF テスターはASTM E-1911-98として規格化され、1999年 Annual Book of ASTM Standards-Construction-に正式に公表された。その Standard を以下に示す。



Designation: E 1911 - 98

Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester¹

This standard is issued under the fixed designation E 1911; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the procedure for measuring paved surface frictional properties as a function of speed using the Dynamic Friction Tester (DF-Tester).

1.2 The DF Tester consists of a horizontal spinning disk fitted with three spring loaded rubber sliders which contact the paved surface as the disk rotational speed decreases due to the friction generated between the sliders and the paved surface. A water supply unit delivers water to the paved surface being tested. The torque generated by the slider forces measured during the spin down is then used to calculate the friction as a function of speed.

1.3 The DF Tester can be used for laboratory investigations and in the field on actual paved surfaces.

1.4 The values stated in SI (metric) units are to be regarded as standard. The inch- pound equivalents are rationalized, rather than exact mathematical conversions.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

E 274 Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire²

E 501 Specification for Standard Rib Tire for Pavement Skid-Resistance Tests²

E 867 Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics²

E 1845 Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth²

3. Terminology

3.1 Definitions:

For Definitions of terms pertaining to this standard, see Terminology E 867.

4. Summary of Test Method

4.1 This test method uses a disk that spins with its plane parallel to the test surface. Three rubber sliders are mounted on the lower surface of the disk. The disk work pavement is brought to the desired rotational velocity, corresponding to the maximum tangential velocity of the sliders. The DF Tester is capable of providing a maximum tangential velocity of 90 km/h (55 mph).

4.2 Water is introduced in front of the sliders and the disk is lowered to contact the test surface so that it bears the full velocity of the disk and model assembly.

4.3 The torque is monitored continuously as the disk rotational velocity reduces due to the friction between the sliders and the test surface.

4.4 The torque signal is reduced to a measurement of friction by converting the torque to the force on the sliders and dividing by the weight of the disk and motor assembly.

4.5 The friction at 20, 40, 60, and 80 km/h (12, 24, 36, and 48 mph) is recorded and the friction - speed relationship may be plotted.

5. Significance and Use

5.1 This test method provides a measure of surface friction as a function of sliding speed, either in the field or in a laboratory.

5.2 This test method may be used to determine the relative effects of various polishing techniques on materials or material combinations.

5.3 The values measured in accordance with this method do not necessarily agree or directly correlate with those obtained utilizing other methods of determining friction properties or skid resistance.

6. Apparatus

6.1 *DF Tester* (see Fig. 1)—The measuring instrument consists of a main body and a control unit. A portable personal computer or an X-Y plotter can be used to record the data. Fig. 1 shows the DF Tester measuring unit, consisting of a fly wheel and disc which is driven by a motor. Three rubber sliders are attached to the disc by leaf springs. The sliders are pressed on the test surface by the weight of the device through three rollers. Each slider is loaded to 11.8 N (2.65 lbf) by the leaf springs. The disc and the fly wheel are connected by a spring

¹ This practice is under the jurisdiction of Committee E-17 on Vehicle-Pavement Systems and is the direct responsibility of Subcommittee E17.21 on Field Methods for Measuring Tire Pavement Friction.

Current edition approved Jan. 10, 1998, Published March 1999.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.03.

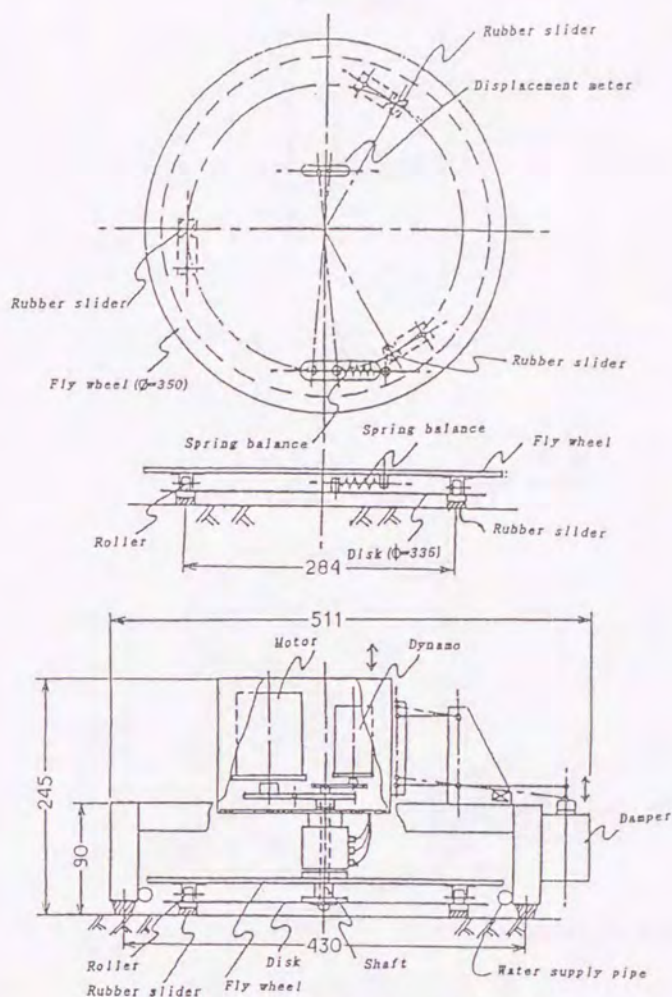


FIG. 1 The DF Testers (Dimensions in mm: 25.4 mm = 1 in.)

balance mounted along a circle on which the rubber sliders are fixed. Due to the forces on the rubber sliders, displacement occurs in a spring balance. This displacement is converted to an electrical signal through a displacement transducer with an accuracy of $\pm 1\%$ of full scale attached to the opposite side of the disc. This signal is output through a slip ring and brush, both of which are mounted on a driving shaft. The speed of rubber sliders is measured from the output of a rotational speed dynamo.

6.2 *Water Supply* (see Fig. 2)—A water supply unit is provided to maintain a wet condition of the test surface. When the tank is 0.6 m above the tester a water flow of 3.6 l/min (0.95 gal/min) is maintained. If the flow is initiated when the rotation corresponds to a tangential velocity of 85 km/h (50 mph) the water thickness will be 1 mm (0.04 in) by the time that the velocity reaches 90 km/h (55 mph) and the measurement is initiated.

6.3 *Slider* (see Fig. 3)—The slider assembly shall consist of a steel backing plate to which is bonded a 6 by 16 by 20 mm

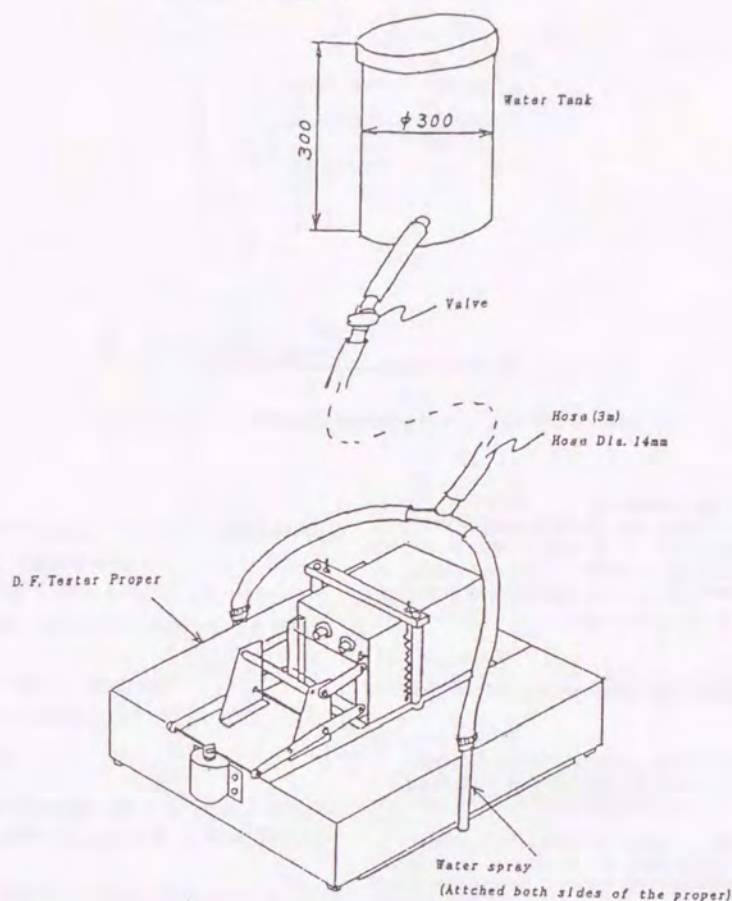
(0.25 by 0.63 by 0.79 in.) rubber shaped as shown in Fig. 3. This shape provides a contact pressure of 150 kPa (21.5 lbf/in.²). The rubber compound shall be synthetic rubber as specified in Specification E 501 and shall have a shore hardness of 58 ± 2 . The sliders shall be replaced due to wear after twelve runs. The slider production date is given on the plastic bag in which they are shipped. The sliders must be used within twelve months of the production date to avoid effects of passive deterioration.

NOTE 1—On extremely harsh surfaces it may be necessary to replace the sliders more often.

6.4 *Data Collection*—The instantaneous value of the friction is detected as a signal from the force transducer. The vibration during measurement is absorbed by a damper. The signal is filtered by a first order R-C filter with a time constant of 0.1 s. The signal may be saved for future analysis.

6.5 *Data Recording*—The tester can be connected to a personal computer and the data can be displayed on the screen

E 1911



Tank must be placed 60cm higher than road surface. The amount of spraying water at the height is 60 cc/min.

FIG. 2 The Watering Apparatus

and stored on floppy discs. As an alternative, the friction signal and the speed signal from the rotational speed dynamo can be recorded using an X-Y plotter to provide a paper record of the relation between friction and speed.

7. Test Samples

7.1 *Field*—Field test surfaces shall be free of loose particles and flushed with clean water. The test surface does not have to be horizontal provided the instrument can be leveled in working position.

7.2 *Laboratory*—Laboratory test panels shall be clean and free of loose particles and shall be held rigidly so as not to be moved by the forces during measurement.

7.2.1 Flat laboratory test panels shall have a test surface of at least 600 by 600 mm (24 by 24 in) with no disturbance from edge effects for a diameter of 500 mm (20 in).

8. Procedure

8.1 Place the DF Tester on the test sample that should be level and free of any contamination.

NOTE 2—It is preferable to operate the DF Tester at a location where the surface is flat. However, it was shown (1) that the effect is negligible for a deviation from flatness of up to 6 mm (0.24 in) over a 0.5 m (20 in) specimen.

8.2 Start the rotation of the disk. Verify that the fly wheel and disc with three rubber sliders rotates without contacting the test surface, and start the water supply.

8.3 When the rotating speed reaches a target speed, water flow is closed and the driving device is lowered to the test surface.

8.4 The measurement begins, the speed of the driving device gradually decreases due to the friction between rubber sliders and the test surface, and finally stops.

8.5 Record the test results or store the data for future analysis.

9. Report

9.1 Report the following information:

9.1.1 Date and time of day,

9.1.2 Individual values of the friction DFT Numbers for

E 1911

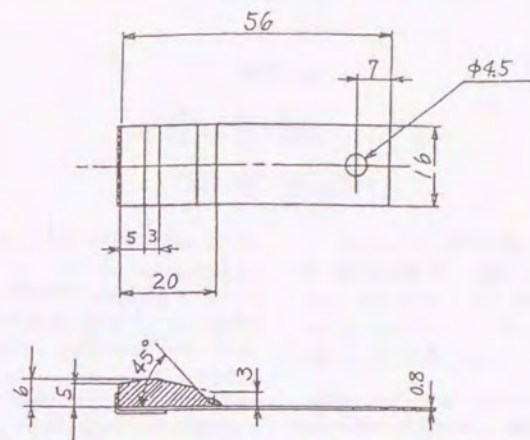


FIG. 3 The Rubber Slider (Dimensions in mm: 25.4 mm = 1 in.)

speeds of 20, 40, 60, and 80 km/h (12, 24, 36, and 48 mph),

9.1.3 Temperature of the test surface,

9.1.4 Type, age, condition, and location of test surface,

9.1.5 Shore hardness and production date of the rubber sliders,

9.1.6 Plot of the friction-speed curve, and

9.1.7 Type and date of the most recent calibration.

10. Precision and Bias

10.1 *Precision*—The standard deviation of eight measurements on the same test surface ranged from 0.044 at 30 km/h to 0.038 at 60 km/h.³

10.2 *Bias*—There is no basis for determination of the bias.

Note 3—Results from the International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements⁴ indicated a correlation with the Skid Numbers from Test Method E 274 produced a correlation coefficient (R) of 0.86. The results also showed that, when used with a measure of Mean Profile Depth, the International Friction Index can be determined by the DF Tester within ± 0.027 .

11. Keywords

11.1 friction; pavements; skid resistance

³ Saito, K., Horiguchi, T., Kasahara, A., Abe, H., and Henry, J.J., *Development of a Portable Tester for Measuring Skid Resistance and Its Speed Dependency on Pavement Surfaces*, Transportation Research Record 1536, Washington, DC 1996, pp. 45-51.

⁴ Wambold, J. C., Antle, C.E., Henry, J. J., and Rado, Z., *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*, Final Report, *Permanent International Association of Road Congresses (PIARC)*, Paris 1995.

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. CALIBRATION

A1.1 *Friction Force Transducer*—Disconnect the power cord to the driving motor. Set up the tester as shown in Fig. A1.1 with the solenoid at the top and the locking screw in place. Apply a calibration mass of 3.6 kg (8 lb) to the spring scale which is attached to a lug by a calibration wire. This corresponds to a coefficient of friction of 1.0. Adjust the knob marked μ -GAIN so that the portable computer or the X-Y plotter reads $1.0 \pm 1\%$. Lift the calibration mass and reapply it several times to verify that the friction remains at $1.0 \pm 1\%$.

A1.2 *Vertical Force*—Set up the DF Tester on a smooth level surface as in the usual measurement condition as shown in Fig. A1.2 and Fig. A1.3. Mark the position of the motor case relative to the frame. Remove the screw from the bottom of the damper. Insert two wooden boards 30 by 70 by 500 mm (1.2 by 2.75 by 20 in) under the tester. Attach a pulley and the

calibration mass of 3.6 kg (8 lb) to the top of the tester as shown in Fig. A1.2 and Fig. A1.3. The mark on the motor case should line up with frame. If not, increase or decrease the spring tension using the adjusting screws as necessary such that the mark on the motor case lines up relative to the frame.

NOTE A1.1—For calibration in the field where it is impractical to use a pulley/weight system a spring scale can be used (see Fig. A1.2). If adjustments were made in the field using the spring scale this fact should be reported with the results.

A1.3 *Slider Tangential Velocity*—The DF Tester is designed so that when the disk rotates at 1500 rpm the slider tangential velocity is 80 km/h (48 mph). Adjust the S.GAIN knob on the control unit such that the speed of 80 km/h (48 mph) is recorded when the rotational speed is 1500 rpm.

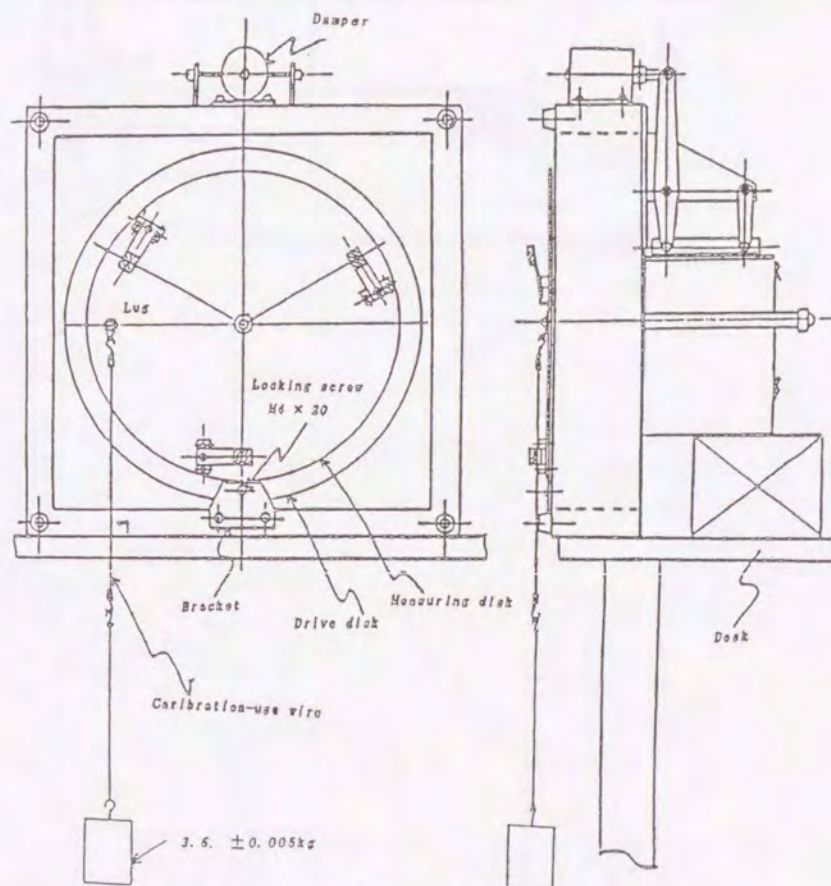


FIG. A1.1 Setup for Calibration of Friction Force

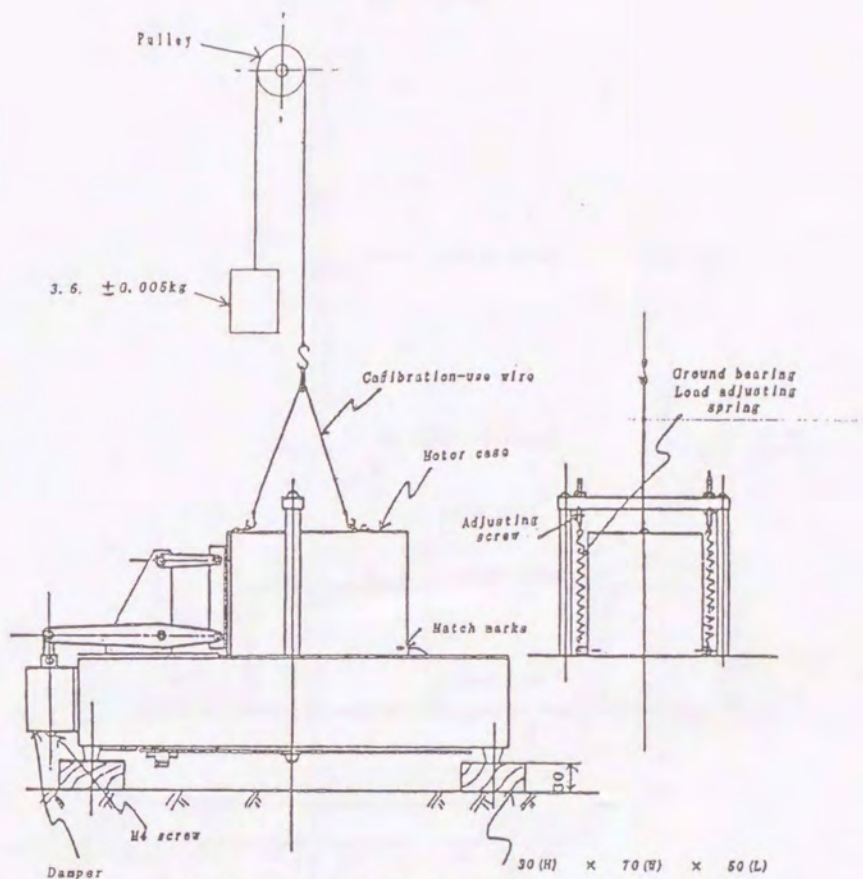


FIG. A1.2 Setup for Calibration of Vertical Force

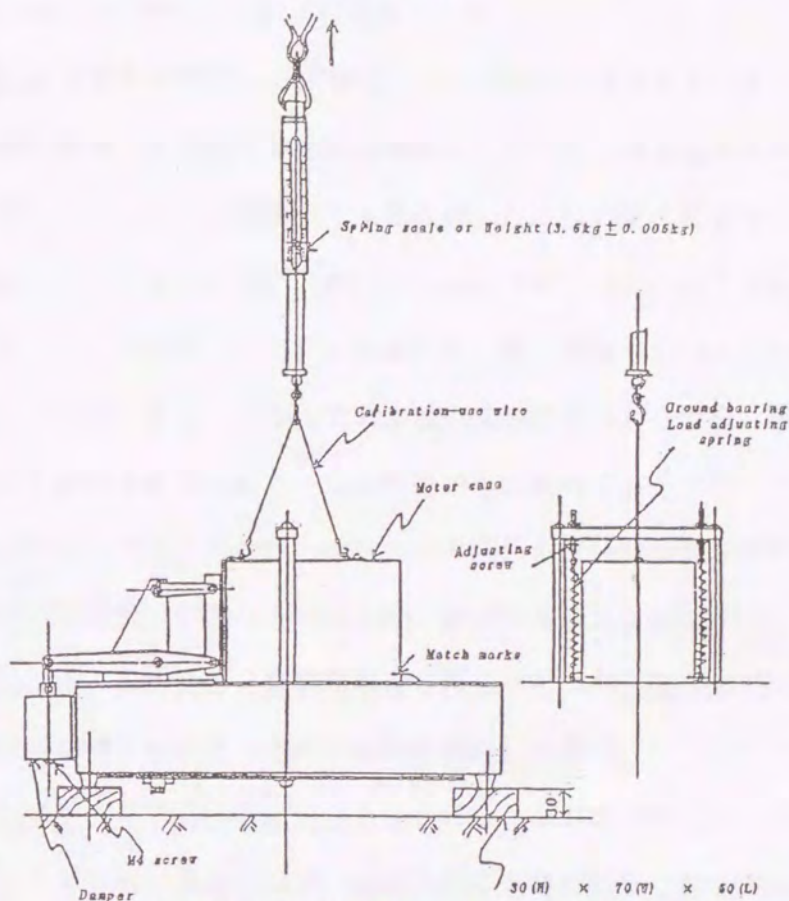


FIG. A1.3 Alternate Setup for Calibration of Vertical Force

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

2. 5 DFテスターSタイプの開発

2. 5. 1 DFテスターSタイプの開発の背景

近年、歩道は都市の快適空間として評価され、快適な歩道を作るために、道幅を広げたり町の景観に配慮して色彩のある舗装材を用いるなど、様々な工夫が行われているが、安全に歩けることや長時間歩いても疲れないことは非常に重要で、舗装材にも安全性や快適性が求められている。しかし、歩道は利用する人の体力や年齢、歩行の目的や速度、履いている靴などがそれぞれ異なり、誰を対象にどのような快適性を歩道に持たせるかは非常に難しい。そこで、歩道の快適性を考える場合、舗装材が安全であれば快適性も評価されると考え、安全性を中心に検討することとした。

歩道舗装材の安全性を考えると、舗装表面の凹凸や舗装材の滑りが問題になる。そこで、今回は歩道舗装材の滑りを取り上げ、検討することとした。

滑りの研究は、人の歩行動作と舗装材の滑り現象をどのような方法で評価し、機械的なすべりの測定結果と一致させるかが命題と言われてきた。「スムーズな歩行をするには、26の骨と107の靱帯および19の筋肉群が複雑な動きをしなければならぬが、それには歩行者の意識や視覚、感覚からの情報が必要であり、中でも静止摩擦係数は歩行に関係する実際のデータとして信頼できる」とするJ. M. Millerの研究¹²⁾や、「普通に歩いているときのかかとの滑りやすさを測定するには、足の動きや床に作用している力以外に、垂直圧力、過重が加えられている時間、滑りを起こす潤滑油などが移動する状況、スライド速度、温度などが影響する。そして、これらを考慮した摩擦係数を測定する試験方法は、分類すると10タイプある」とするC. Bringの論文³⁾など、歩行状況や滑り現象を解析し評価した論文は多くあるが、滑りをどの機械で測定し、どのように評価するかは確立されていない。しかし、静止摩擦係数が重要なデータになることは、多くの人が認識している。

R. Skiba¹³⁾は歩行者を対象とした摩擦係数測定試験機に求められる条件として、次のような項目を上げている。

- a) 歩行サイクルに可能な限り忠実で精密なシミュレーションができること。
- b) 技術的には単純な構造で簡単に操作できること。
- c) 装置は携帯でき、どのような床面でも測定できること。
- d) 測定結果に再現性があること。

また、歩行サイクルに忠実で精密なシミュレーションの具体的な内容としては、

- a) 普通の靴を使って測定でき、靴を交換できること、また靴の角度が垂直方向に 25° 、垂直方向に 360° 変更可能なこと。
- b) 垂直方向、水平方向の力が人の歩行に合わせて変更できること。
- c) 約 0.5 m/sec までの滑り速度で滑り出す瞬間の最大静止摩擦係数と動摩擦係数が測定できること。
- d) 靴を床に着地させる時間が短いこと。
- e) 滑り良くする材料をまくことが出来ること。

などをあげているが、今までの試験機はいずれもすべての条件を満たしていないとしている。

最近、日本においても歩道、通路、建築物内ですべて、転び怪我をするケースが非常に多くなっているようである。現在の進行する高齢化社会では、特にすべりについては非常に重要な一因と考えられる。そこで、実際の現場において、簡単で、しかも手軽に、誰でも測定でき、すべりを数値で表せる測定装置が必要になってくる。

わが国ではアスファルト舗装要綱で、歩道のすべり抵抗性を英国式ポータブルテスター (BPT) を用いて評価するとしているが、歩道舗装材のように目地があったり、傾斜している舗装面では測定できないことから、歩道のすべり抵抗性を評価するには適していないと考えられる。また、小野式すべり試験機 (O-Y PSM) や靴すべり試験機なども使用されているが、これらは実験室で用いられるものであり、施工してある歩道など現場で簡単に測定できないなどの問題もあり、新たな試験装置の開発が求められている。

2. 5. 2 DFテスターSタイプの開発目標

歩行時の滑りを評価する方法の一つとして、舗装面と靴底の静止摩擦係数を測定する方法がある。摩擦係数の評価には、舗装表面の乾湿状態や埃の有無、テクスチャー、舗装面の傾斜度や靴底材料の材質、歩行の状況や歩行速度、歩行者の体力などおおくの要因が関係してくるが、これらの要因を全て試験機の中に組み込むことは出来ない。また、歩道で滑りが発生しやすい状態を考えると、雨の日に濡れている平滑な舗装面上を急いで歩いている場合が多い。そこで、このような環境での測定が必要と考え、「歩行時に危険な滑りはかかとを着地させて体を支えようとする0.05～0.14秒の間に発生する滑りで、この間の最大静止摩擦係数を測定する必要がある。」とするR. Skiba¹³⁾の研究や、「歩行において足と床の滑りは静止摩擦係数であるが、動摩擦係数は足がスリップし始めたときに有効である。」としたR. Brungraber¹⁴⁾の研究などを参考に、次のような条件の試験機を開発の目標とした。

- a) 静止摩擦係数と速度に対応した動摩擦係数が測定できること。
- b) 乾燥状態と雨の日を考えた湿潤状態で測定できること。
- c) 目地や低い段差があっても測定できること。
- d) 傾斜している舗装面でも測定できること。
- e) 靴底材料の交換が容易に出来ること。
- f) 測定機が軽量で屋外でも測定できること。
- g) 測定結果が記録紙などに残ること。

以上の条件から、本試験機は先に述べた車道のすべり抵抗性測定に使われており、ASTMに規格化されたDFテスターをベースにして歩道など舗装材のすべり抵抗性を評価するDFテスターSタイプを開発した。

2・5・3 DFテスターSタイプの構造

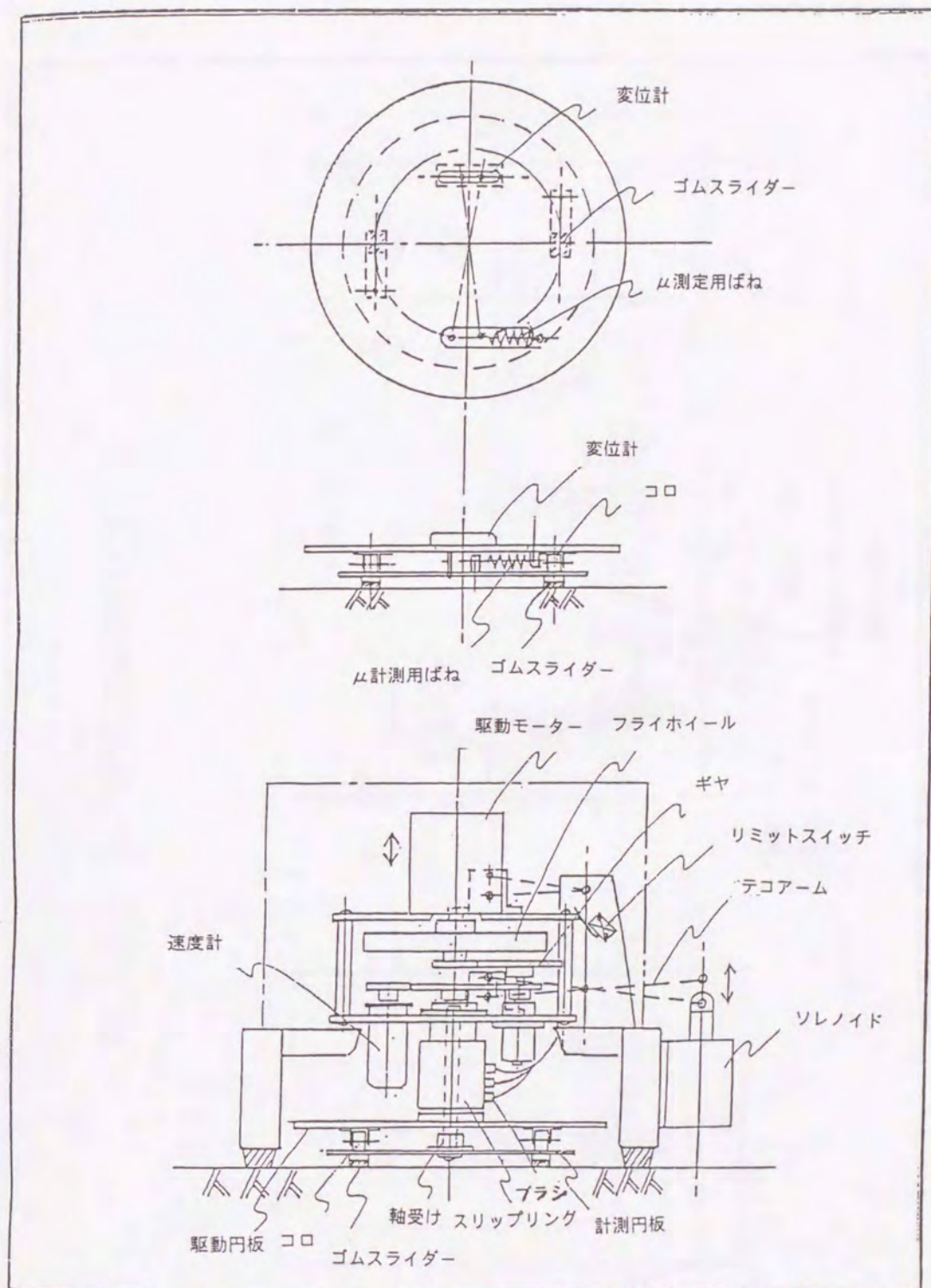
本装置の測定理論はDFテスターと同様であり、本章の(2・1)式で求められる摩擦係数の測定を行うものである。これを歩行のすべりに当てはめてみると、靴底材料は舗装材より強度が弱く、歩行すると靴底は舗装面の凹凸で引きちぎられながら摩擦し、同時に摩擦が生じる。この時、靴底ゴムのような弾性材料は、押し付ける荷重が大きいと接触面が変化する可能性があり、本試験装置では測定時の靴底ゴムが変形し難い構造とする必要がある。また、動摩擦係数を測定する場合、すべり速度が速いと摩擦熱で靴底がゴムの温度が上昇したり、舗装材の温度が高いと材質が変化する可能性がある。しかし、一番すべり易い条件は湿潤状態であることから、この状態では靴底ゴムが水で冷やされ、熱で材質が変化する可能性は少ないし、舗装材と靴底が密着していない限りゴムの粘弾性は影響しない。

開発された試験装置の構造は、図-2・14に示すように、駆動モーターに直結されている駆動円板と軽量の材質のすべり円板からなっており、2つの円板はスプリングバランスで接続されているというように、構造上ではDFテスターと同様である。すべり円板には2個のゴムスライダー(DFテスターでは3個)が回転半径7cmの位置で取り付けられ、接地圧は 1.25 kgf/cm^2 、ゴムスライダー1個の接地面積は 0.8 cm^2 である。

DFテスターSタイプは測定装置本体(重量16kg、写真2-8)と、図-2・15に示す静止摩擦係数と動摩擦係数のコントロール装置および摩擦係数を記録するX-Yレコーダーからなるコントロール装置一式(重量11kg、写真2-9)で構成されている。

本装置は従来の動摩擦係数の他に静止摩擦係数も測定できるところに特徴がある。動摩擦測定の場合は図-2・15の静、動摩擦切り換えスイッチ:19をDYNAMICに、静止摩擦の測定の場合は切り換えスイッチ:19をSTATICに合わせる。図-2・14において、3はフライホイールで大きい慣性を有しており、駆動モーター:1によって回転を与えられる。 载荷用円板:13の下方には同軸上に自由に回転できる

DFテスターSタイプの開発に成功した。



図—2・14 DF テスターSタイプの構造

DF TESTER (S-TYPE) CONTROLLER

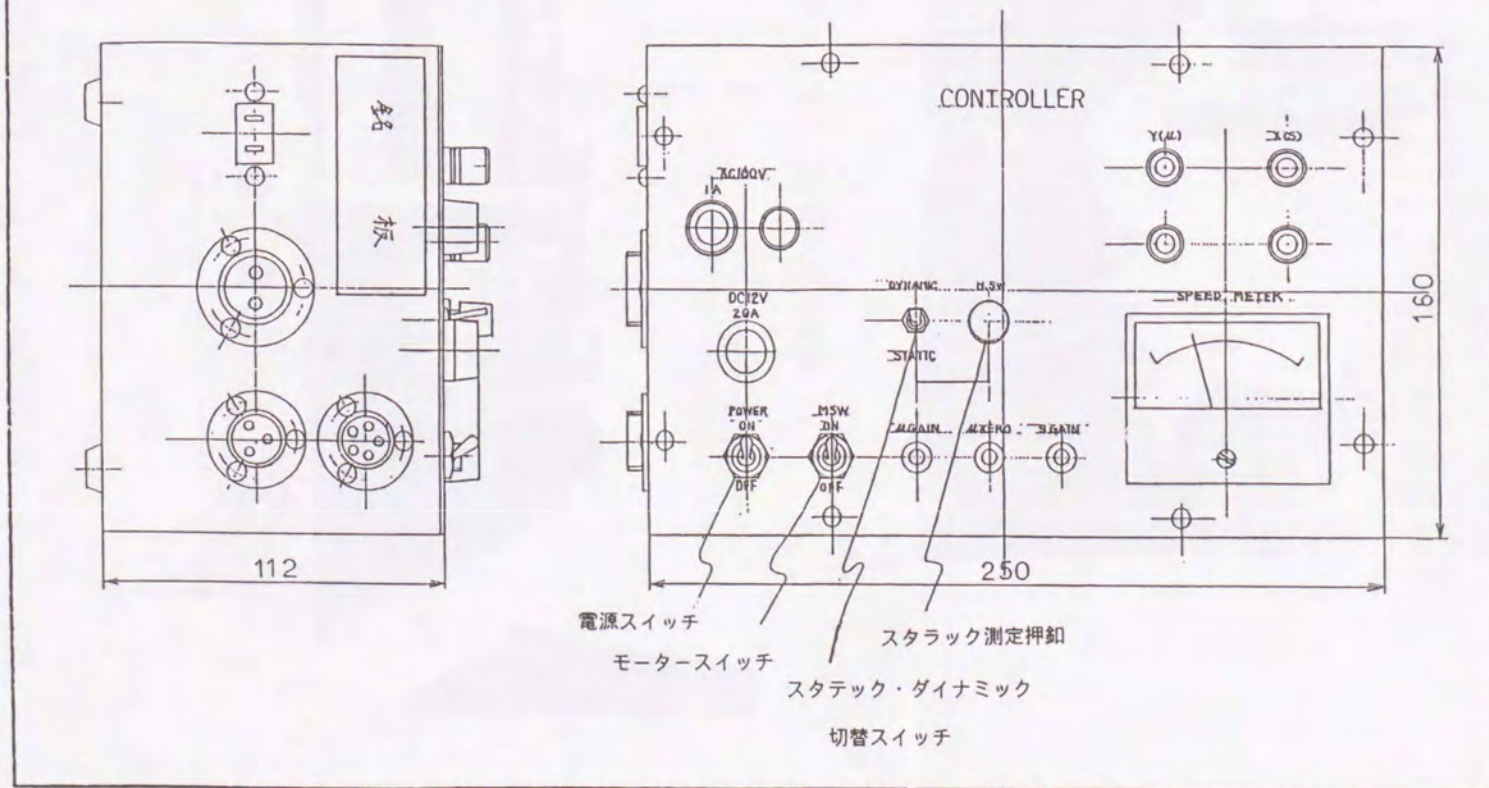
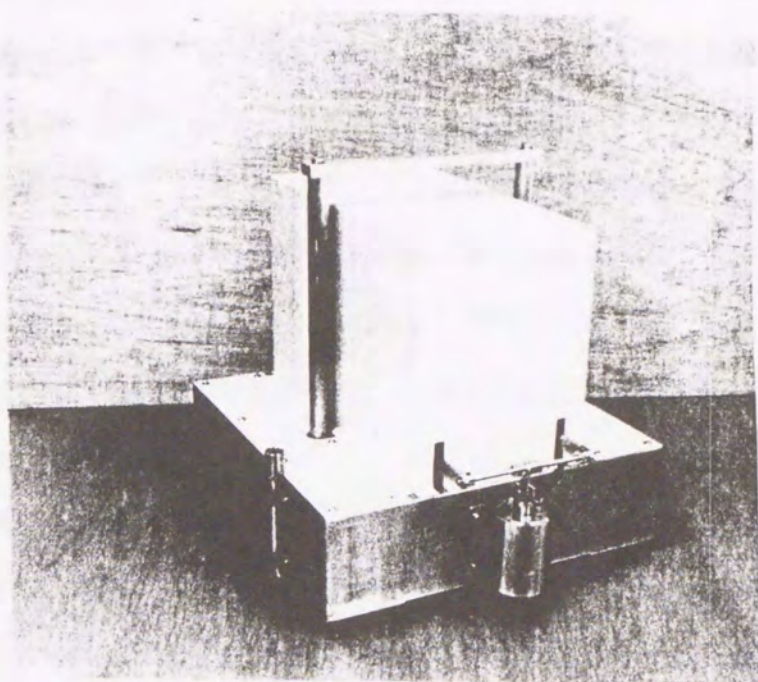
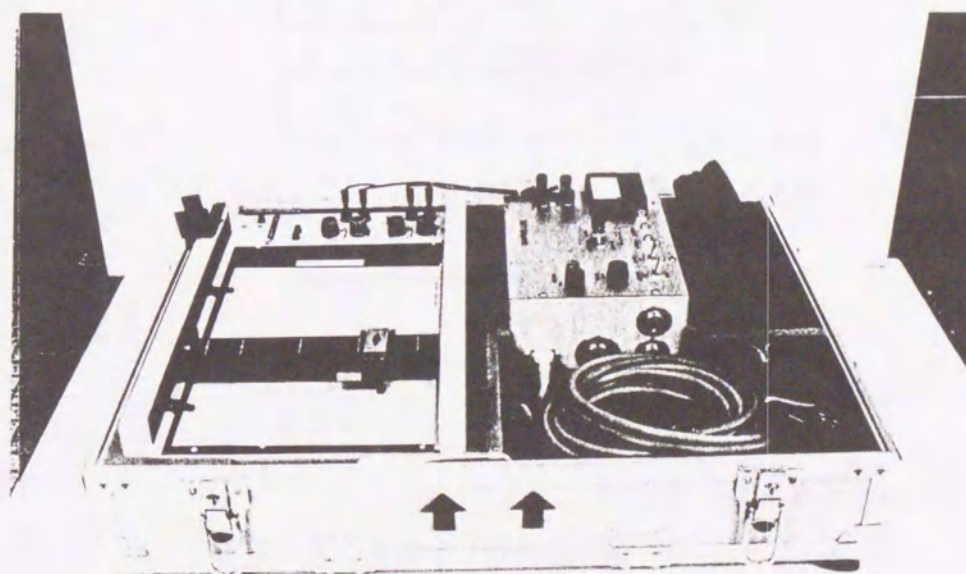


図-2・15 DFテスターSタイプのコントロール装置



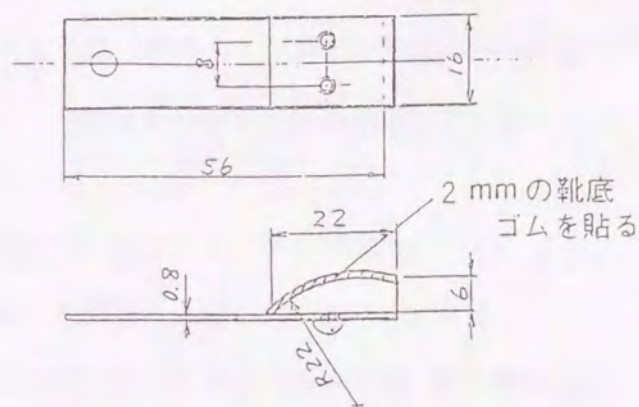
写真一 2・8 装置本体の写真



写真一 2・9 コントロール記録装置

慣性の小さいスライダー取り付け用円板：14があり、この円板の下面には2個のスライダー：8が取り付けられている。このスライダー：8は载荷用ベアリング：7を通して本体の自重によって路面に押しつけられる。载荷用円板：13とスライダー取り付け用円板：14はバネバランス：15によって結ばれている。この変位は μ 測定用ポテンシオメーター：9によって電気量に変換される。この電気量は駆動軸：16に取り付けられたスリップリング：5とブラシ：6を通して外部に取り出される。スライダー：8の速度は载荷用円板：13の回転速度として速度計発電機：2によって出力される。

靴底ゴムは図一2・16に示す板バネのついたスライダーに靴底材料を接着して測定するが、ゴムの変形の影響を少なくするために厚さ2mmの板ゴムを使用する。また、ゴムを加工しなくても接地面積が一定になるようにスライダーは局面構造になっている。靴底ゴムはASTM E-501準拠のゴムを基準ゴムとしている。



図一2・16 板バネのついたスライダー

2. 5. 4 DFテスターSタイプの測定手順

本試験機では、靴底ゴムが舗装面上を接触しながら回転するときに生じる駆動円板とすべり円板とのずれを、バネバランスと変位計により電気量に変換し摩擦係数を求める。静止摩擦係数は、静止した状態で靴底ゴムを舗装面に置き、駆動モータを回転させて動き出す瞬間の摩擦係数として測定される。動摩擦係数は、靴底ゴムが求める

速度より 2 km/h 程度大きい速度に達した時に、円板を舗装面に着地させてそれぞれの速度に応じた摩擦係数が測定される。本測定装置で動摩擦係数と静止摩擦係数を測定する手順を示すと次のようになる。

(A) 動摩擦測定

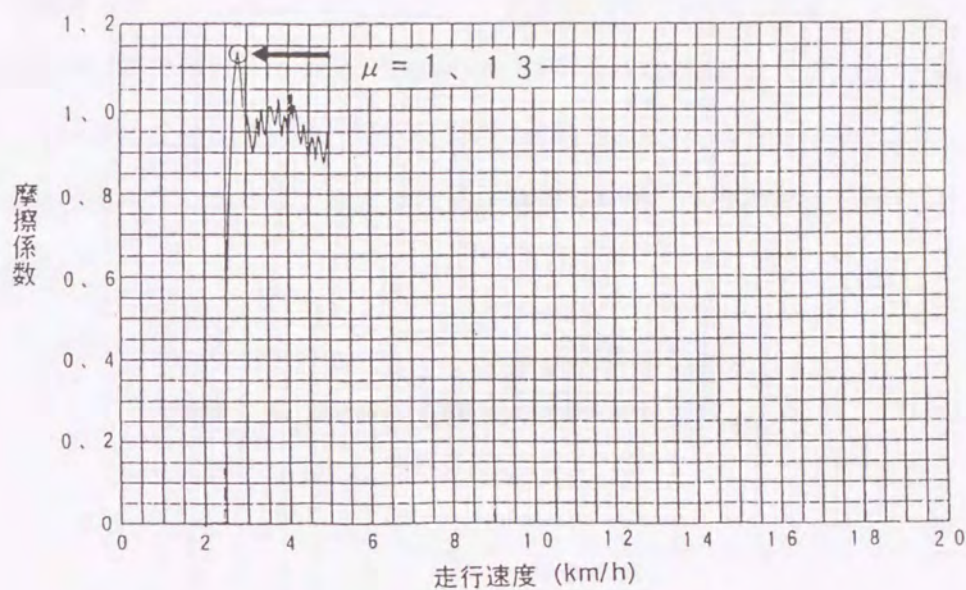
1. 静、動摩擦切り換えスイッチを DYNAMIC に合わせる。
2. スライダーが浮いた状態で回転する。
3. 円板の回転速度が設定速度に達した時点で、スイッチを off にすると、駆動部が落下してスライダーが路面に押し付けられる。
4. 回転しているスライダー取り付け用円板と载荷用円板はスライダーと路面との摩擦力によって次第に減速し停止する。
5. この間の摩擦力の変化はバネバランスと μ 測定用ポテンシオメーターによって電気量として検出される。この時生ずる振動はダンパーによって吸収されるようになっている。
6. 検出された電気量（摩擦力）と速度計発電機から速度出力を、X-Yレコーダに記録し、摩擦係数と速度の関係を表示できるようになっている。

(B) 静摩擦測定

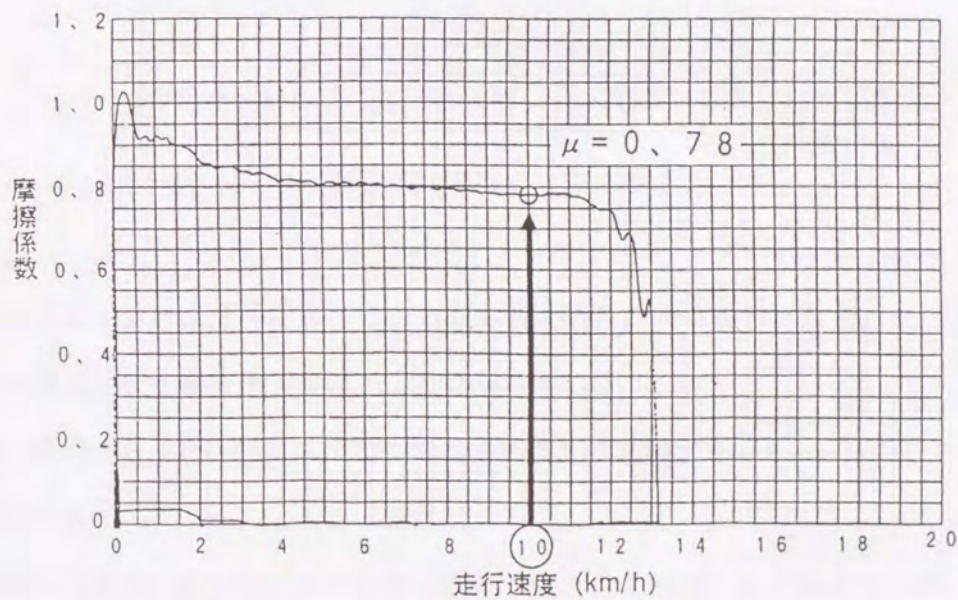
1. 静、動摩擦切り換えスイッチを STATIC に合わせる。
2. スライダーを路面に接触した状態にしておく。
3. 駆動部を回転させる。回転し始める際、载荷用円板とスライダー取り付け用円板の間に摩擦力により変化が生じる。その変化はバネバランスと μ 測定用ポテンシオメーターによって電気量として検出される。この電気量（摩擦力）は X-Yレコーダに静摩擦係数として表示される。

本測定装置では X-Yレコーダーで測定結果を記録するが、その読み取り方法はゴムスライダーを舗装面に接触させ、動き出す瞬間の摩擦係数を図—2・17 に示すように読み取る。また、動摩擦係数はゴムスライダーを舗装面に接触させずに回転させ、回転数が 12 km/h になった時に舗装面に接触させて図—2・18 のように必要な速

度における摩擦係数を読み取る。歩道では速度が10 km/hの時を基準にして摩擦係数を求めることとしている。



図一2・17 静止摩擦係数の記録紙と値の読み方



図一2・18 動摩擦係数の記録紙と値の読み方

このように、静止摩擦係数はゴムスライダーが動き出した瞬間の摩擦係数を測定するので、測定結果とX-Yレコーダーの値に差が出る可能性がある。そこで、コンピュータで摩擦係数と回転速度を細かくサンプリングし、記録紙での測定結果と比較した。その結果、図-2・19に示すように、本測定装置では測定開始後59.6 msecで最初のピーク値を示し、このピーク値が同じ値が600 msecまで続いていた。一方、X-Yレコーダで記録した値は、記録を始めてから0.5 sec程度ずれていピーク値を示しており、X-Yレコーダの測定値は静止摩擦係数のピーク値を表していることが確認された。

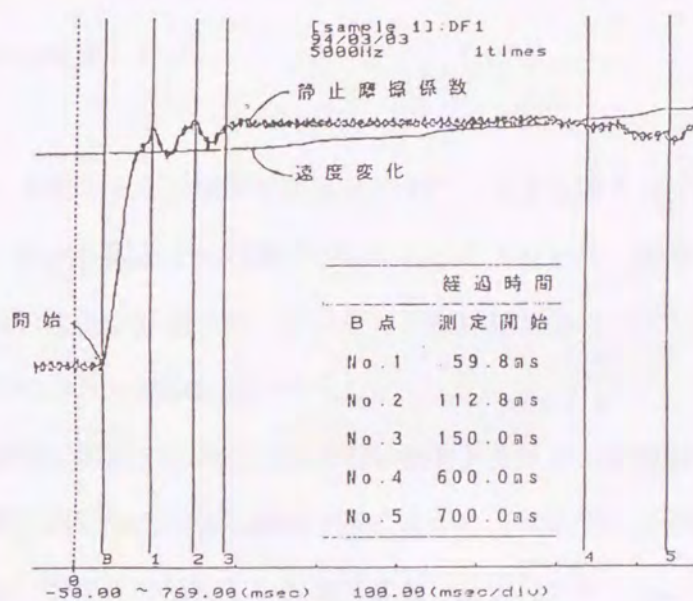


図-2・19 静止摩擦係数の測定記録

以上を示した DF テスターS タイプの諸元をまとめると次のようになる。

- 静止摩擦係数と動摩擦係数は、 μ で表示する。
- 静止摩擦係数は、靴底材料が舗装表面を動き出す瞬時（60 msec 以内）の μ を測定する。
- 動摩擦係数は、靴底材料が舗装面を移動するときの速度（1～15 km/h）に応じた μ を測定する。
- 靴底に相当するゴムスライダーの回転半径は 7 cm で、2 個を一組としてセッ

トされ、ゴムを治具に張り付けるだけで容易に交換できる。

- e) ゴムスライダーの接地圧は 1.25 kg f/cm^2 で、 $\mu = 1$ の時の回転トルクは 14 kg f/cm^2 となる。
- f) 測定結果は X-Y レコーダに記録され、その場で結果を読むことができる。
- g) 試験機重量は、本体 16.5 kg 、コントロールユニット 11.0 kg と軽量で、容易に持ち運びができ、電源は自動車用バッテリーからもとることが出来るので、屋外での測定が可能である。

2・6 本章のまとめ

本章では、従来のすべり抵抗測定装置のもつ欠点を克服すべく新しく開発したポータブルすべり抵抗装置とその性能について述べるとともに、国際共同実験などに参加してこの装置の性能が評価され、アメリカの材料試験協会 (ASTM) のスタンダードとして規格化された経緯について示した。

現在、世界的に実用化されている英国式振り子テスターは路面とゴムスライダーの接触面の微妙な調整が測定値に影響することから、測定車により個人差があり、また低速領域におけるすべり抵抗しか評価できないといういくつかの問題点を有している。そこで、これらの問題点を解決する動的すべり測定装置、DF テスター (Dynamic Friction Tester) を開発した。開発した装置はポータブルなすべり抵抗装置で、小型で持ち運びが容易であり、操作が非常に簡単で測定者の個人差がなく、測定時間も非常に短いものである。この装置の測定原理は従来の振り子式に対して、円形に回転する円板にゴムスライダーを取り付けるという世界で初めての測定方法を用いていることおよび1回の測定ですべり抵抗の速度依存性を評価できることが極めてユニークな特徴である。本章では、このDF テスターの速度依存性測定の統計的評価、わだち(凹凸路面)における影響評価を行い、その性能を確認している。

さらに、1992年9月と10月の2ヶ月間ベルギーとスペインでの国際共同実験

に参加した実績を背景に、1998年にアメリカASTMの標準規格に採用され、E-1911-98の番号（スタンダードナンバー）を取得した経緯を示している。

また、近年の高齢化社会により、歩道、公園の遊歩道やビルディング床のすべりが問題になりつつあり、これに対処すべく、実験室および現場で使用可能な測定装置の開発を試みた。人が歩く場合は動摩擦だけでなく、静摩擦も考慮する必要があることから、この両方を一つの装置で測定でき、しかも簡便に測定できる装置を目的としてDFテスターSタイプの開発に成功した。

静止摩擦係数は、人の体重が舗装面にかかるときの接地圧で測定し、動摩擦係数は人の足が歩道表面を動く速度を考慮して測定速度を決めている。本章では、開発されたDFテスターSタイプの構造などを示すとともに、その性能評価の結果を示している。持ち運びが容易で測定結果が紙に記録され、個人差が少なく、靴底材料も容易に交換でき、舗装面に凹凸や目地があったり、舗装面が傾斜していても測定できる装置である。したがって、歩道以外にも、公園の散歩道や遊園地などの舗装面、ビルや体育館などの建物床面、陸上競技のトラックなど、人が歩行するあらゆる場所における摩擦係数を測定することが可能である。

参考文献

1. K.Ichihara and H. Abe : Second International Symposium on Road Surface Characteristics (1992.6.26)
2. Cyril F. Ekkebus and William Killey : Measurement of Safe Walkway Surfaces (1973)
3. Christer Bring : Testing of slipperiness, Swedish Council Building Research (1982)
4. 牧恒雄 : 人に優しい舗装材とは
5. 小森谷一志、池田拓哉、谷口聡 : 「歩行者系舗装の歩きやすさの評価手法に関する研究」舗装工学論文集第2巻 1997年12月
6. 牧恒雄、竹内廉、小梁川雅、安部裕也 : 「歩道舗装材の摩擦係数測定試験機に関する研究」舗装工学論文集第2巻 1997年12月
7. 小森谷一志、池田拓哉、谷口聡 : 「歩行者系舗装の歩きやすさの評価」建設省土木研究所 土木技術資料 平成9年第11号
8. ASTM: ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Volume 04. 03(1999)
9. 斉藤和夫、安部裕也、笠原篤、堀口敬 : 「路面のすべり抵抗と速度依存性を測定するポータブルテスターの開発」土木学会北海道支部論文報告集 第52号
10. KAZUO SAITOU, TAKASHI HORIGUCHI, ATSUSHI KASAHARA, HIRONARI ABE, JOHN J. HENRY : 「Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and Its Speed Dependency on Pavement Surfaces」TRB 1996 Transportation Research Record No. 1536
11. 安部裕也、笠原篤、山之口浩 : 「動的路面すべり摩擦測定器 (DF テスター) の開発と応用」平成11年代23回日本道路会議一般論文集 (C)
12. James M. Miller : 「A Bibliography of Coefficient of Friction Literature Relating to Slip Type Accidents」Center For Ergonomic and Safety Department of Industrial and Operations Engineering, 1983
13. R. Skiba, Wuppertal : 「Geräte zure Bestimmung der Reibung zwischen Schu und Fusboden

unter Berücksichtigung des menschlichen Ganges] Kautschuk+Gummi Kunststoffe 37,
Jahrgang, Nr. 6, 1984

14. R. Brungraber : 「An Overview of Floor Slip/Resistance Research With Annotated
Bibliography」 National Bureau of Standards Technical Note 895, 1976

第3章 P I A R C 国際共同実験によるDFテストの国際比較

3. 1 P I A R C 国際共同実験の目的

道路の路面や滑走路はその上を走行する車両に対して十分なすべり抵抗が確保されていなければならないことは既に述べたが、このすべり抵抗やそれに密接に関係する路面のテクスチャー(texture)を測定する原理や装置のタイプ、測定速度、水膜厚などの測定方法が各国さまざまである。そのため、舗装路面の設計や維持管理におけるすべり抵抗やテクスチャーの基準も異なっているのが現状である。また、調査・研究結果の評価や検討において相互の比較が困難であるなどの問題もあり、世界的に統一したすべり抵抗値の指標の開発が求められてきた。

このため、世界道路協会(PIARC)の路面特性に関する技術委員会(TC 1、J.J.Henry委員長)は、世界中の国々で使用されているすべり抵抗およびテクスチャー測定装置で測定された結果を比較する手段を開発する国際共同実験を企画した。過去の多くの実験とは異なり、この実験は測定値を比較するとともに、基準化(harmonize)することを目的としている。基準化とはそれぞれの測定装置が共通の値(common value)を報告できる方法を提供することである。したがって、この実験の結果は国を越えて統一した舗装マネジメントの方法を確立するのに役立つものと考えられる。さらに、舗装材料の規格を標準化するためにも、測定方法の基準化が必要となる。

すべり抵抗測定装置間でデータを相関させる試みはこれまで多く行われてきた。その結果は、特に試験路面が類似したタイプの場合に良好な相関を示したが、一般的な相関は得られていない現状にある。車輪ロック方式、サイドフォース方式およびスリプ方式などの異なる測定方法で得られた測定データを相関させるには路面のテクスチャーに関する情報を使用することが必要である^{1), 2)}。このような背景のもとで、PIARC は多くの国際機関の協力のもとに、1992年にベルギーとスペインで路面性

状とすべり抵抗測定 of 国際共同実験を実施し、上述した世界的な課題の解決に取り組んだ。実験の最終目標は、各国で使用されている多くの異なる路面のすべり抵抗測定装置を共通のスケールで基準化することであり、そのためには次の目標を達成することを目指した。

- 1) テクスチャー、速度、スリップ角(slip angle)、試験タイヤ、天候、材料などの変化する物理的試験条件のもとで、各種の装置で測定されたすべり抵抗の間の関係を把握し、評価すること。
- 2) 技術情報の交換と基準化が可能なように、規定された条件のもとで、各種の装置で得られたすべり抵抗とテクスチャーの標準的な指標間の関係を定量化すること。
- 3) 各種装置の再現性(repeatability)と測定誤差(measurement error)を定量化すること。
- 4) すべての装置が報告できるような国際的な指標を開発すること、および各装置がこの指標を測定できる能力を評価すること。

3. 2 P I A R C の組織

PIARC (Permanent International Association of Road Congresses) は、日本では「常設国際道路会議協会」と呼ばれ、道路と道路建設技術に関する最も古い国際機関である。

1909年(明治42年)に設立され、会員構成は政府機関、公共団体等及び個人から成る。1991年時点で、日本政府(建設省)を含めて世界の64カ国がこれに参加している。

PIARC は図-3・1に示すように、運営に関する重要事項に審議する実行委員会の下に12の技術委員会(Technical Committee:TC)と3つのワーキンググループ(WG)から構成され、各技術委員会は独自に年1~2回の会議を開催するほか、4年に1回開かれる国際道路会議に向けて特定課題の報告を作成検討を行っている。今回の国際共

同実験は図中の技術委員会：路面特性委員会（TC-1）の特定課題「舗装路面のテクスチャーとすべり抵抗測定値の比較と基準化に関する国際共同実験(International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurement)」³⁾として実施されたものである。この実験には室蘭工業大学の斉藤和夫教授が TC1 の専門委員(Expert Member)として企画段階から参加し、日本から DF テスターと Komatus Skid Tester の2種類のすべり抵抗測定装置が参加した。本章ではこのうち、DF テスターによる測定結果について示すものである。



図-3・1 PIARCの組織図

3. 3 実験箇所

PIARC 国際共同実験は 1992 年の 9 月と 10 月の 2 ヶ月にわたり実施された。実験箇所はベルギーで 28 箇所（空港の 2 箇所、レース走行路上の 4 箇所、と一般道路の 22 箇所）とスペインで 26 箇所（空港で 8 箇所と一般道路の 18 箇所）の総計で 54 箇所である。全ての参加装置は実験箇所に集合し、時間が進行するにつれて生じると思

われる大きな温度差やその他の変化をさけるために、全ての測定をできるだけ短時間に実施した。16 カ国からの参加者により、54 項目が測定された。

3. 3. 1 実験箇所の選択基準

測定結果を基準化するための分析に必要なデータの範囲をカバーするために、適切な実験箇所の選択が重要となる。実験箇所には、次の項目についての高い値と低い値の全てを包含するような各種の路面が含まれていなければならない。

- ・ ミクロテクスチャー (microtexture)
- ・ マクロテクスチャー (macrotexture)
- ・ ポリッシングと磨耗 (polishing and wear)

実験箇所にはそれぞれのテクスチャー範囲における 2 つの水準 (粗い、細かい) よりなる 2×2 の因子を全て含み、さらにマクロテクスチャーの中間水準およびいくつかの混合したマクロテクスチャー (細かい、粗い) を補充する路面を網羅すべきである。その他の条件としては、次のものがある。

- ・ 最小でも 150m であること。
- ・ 最大勾配が $\pm 2\%$ 以内の直線かつ平坦であること。
- ・ 交差点が無く、クラックあるいは穴等の特別な欠陥が無い均等なテクスチャーを持つ路面であること。
- ・ 同一区間で繰返し走行が便利のように、両端近くで転回が容易にできること。
- ・ 実験箇所の付近に、試験装置の部品を置く空き地あるいは駐車場所があること。
- ・ 実験装置に吸水する場所、あるいはタンク車で現場に水を運ぶことが可能であること。
- ・ 実験箇所のうちの約 $3/4$ はアスファルト舗装、 $1/4$ はコンクリート舗装である。
- ・ 試験箇所は安全に測定が行われること。したがって、交通量が少ない場所を選ぶか、交通規制が必要になる。

これらの条件を考慮した事前調査により選定されたベルギーとスペインの実験箇所

を図一3. 2に示す。



Figure 1. Location of the sites in Belgium.

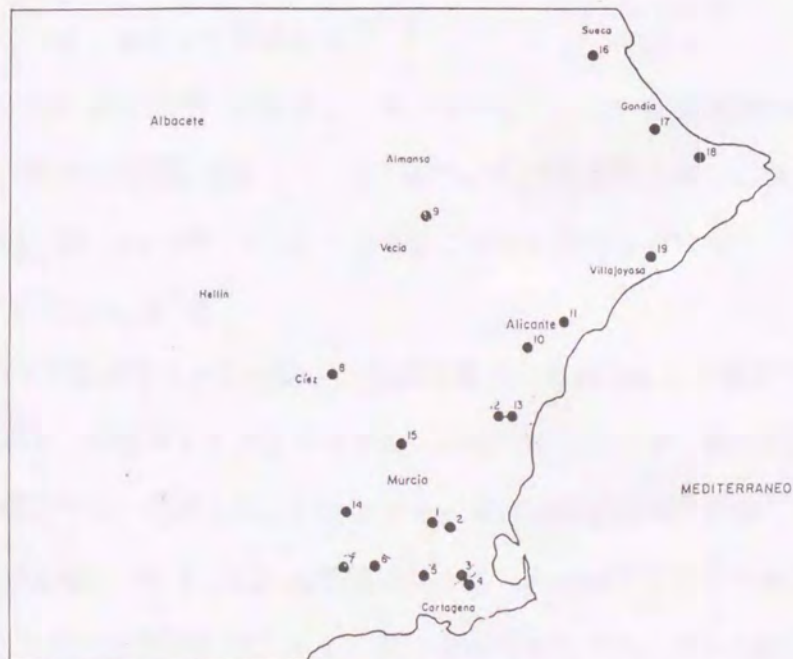


Figure 2. Location of the sites in Spain.

図一3. 2 ベルギーとスペインの実験個所

3.3.2 実験箇所での測定

摩擦測定車 (friction tester) は、可能な限り 30、60、90km/h の 3 種類の速度で走行した。試験速度が決まっている装置は、その速度に最も近い 3 種類の速度のいずれかに合せた。実験では 3 種類の速度の各々について、4 回の繰返し測定を行うように計画した。1 回の走行で 2 つの平均値を与えるように、試験区間を 2 つの区間 (A と B) に区分した。4 回の繰返し走行は別々に行った。区間 A と B は同じ条件になるように試験したが、統計的に同じと考えられない箇所を確認し、分析では別の区間として処理した。テクスチャー測定は摩擦測定を行う前 (すなわち、路面に散水する前) に行った。

ベルギーでは、2 台の振り子テスターを用いて、1 台は摩擦試験を行う前に、他の 1 台は摩擦試験が完了した後に試験するスケジュールを組んだ。スペインでは、2 台の振り子テスターの相関を得るために、両者を連続して測定した。

3.3.3 除外した実験箇所

規定に合わない箇所、半数以上のテクスチャーあるいは摩擦測定装置データが使用できない箇所を詳細に調査した。その結果、以後の分析で使用しなかった箇所は、3、10、26.2、34、41、69、と 70 である。これらの箇所で十分なデータが得られなかったのは次の理由による。

Site 3 : 実験が行なわれた時、付近の農場での農作業により路面が泥に覆われた。

Site 10 : この箇所でテクスチャー測定が行なわれたとき、路面が濡れた。このような状態では、ほとんどのテクスチャー測定装置は適切に作動しない。

Site 26.2, 41 と 70 : これらの箇所は排水性 (porous) アスファルト舗装であった。

いくつかの装置のテクスチャー測定値は排水性アスファルト路面で意味がないことがわかったので、これらの箇所では装置間の比較が困難になるために除外した。装置 A2 はこのような路面について「有効」データを報告できたが、テクスチャーの深い部分はどんなプロフィロメータでも測定できないことを注意する必要がある。

る。

Site 34 : この箇所はごく最近のサンドエポキシでオーバーレイされた。

Site 69 : この箇所はセメントコンクリートスラブ路面で深い充填されない継ぎ目があり、これが車両によるテクスチャー測定に大きく影響した。測定データから継ぎ目上の測定値あるいは測定の乱れを除去出来なかった。

3. 4 摩擦測定装置と試験タイヤ

PIARC 国際共同実験に参加した測定装置は、日本から参加した DF テスター (A13)、KOMATU SKID TESTER (C4) の 2 種類を含めて 17 カ国から 42 種類の装置であるが、そのうち摩擦測定装置は 30 種類である。それらは 1 台で複数の測定方法を用いることができる装置がある。実験に参加した装置の測定方法は大きく次のような 3 つの方法に分けられる。

1. 車輪ロック試験機 (Locked Wheel Tester)

測定装置のタイヤを完全にロックした状態、すなわちすべり率 100% ですべり抵抗を測定する方法。主にアメリカを中心に開発、使用されている。今回解析に用いた装置では、B1LKD、B2LKD、B5LKD、B6-501、B6-524、C1、D6 がこれに属するものである。

2. サイドフォース測定 (Side force tester)

測定装置のタイヤを進行方向に対して一定の角度で傾けたコーナリング状態ですべり摩擦抵抗を測定する方法。主にイギリスを中心に開発、使用されている。今回の解析に用いた装置では、B10E、C3B、C3E、C6E、C8、C9、C10、D1E、D2、D3、D4、D5 がこれに属するものである。

3. スリップ率固定式装置 (Fixed Slip Tester)

測定装置のタイヤのすべり率を一定の値に固定しながらすべり摩擦抵抗を測定する方法。すべり率を変化させながら測定する装置はすべり率変動式装置 (Variable Slip

Tester) と呼ばれる。今回解析に用いた装置では、B1SLP、B2SLP、B3、B5SLP、C5、D8 などがあり、特殊な場合とし B1ABS、B6CHP などがある。

その他に、A12 から A14 の振り子式および DF テスターのポータブル測定装置が 3 台含まれている。それらの測定方法を含めた摩擦測定装置の一覧を表 3. 1 に示す。

表 3. 1 実験に参加した摩擦測定装置¹⁾

DEVICE ID	DEVICE NAME	TYPE	TIRE TYPE	SLIP %	SPEED
A12	ROSAN	SLIDER	BLANK	100	10
A13	DF TESTER (J)	SLIDER	BLANK	100	0-80
A14	BRITISH PENDULUM (US)	SLIDER	BLANK	100	10
B1-ABS	STUTT.REIBUNGSMESSER (CH)	OPTIMUM SLIP	RIBBED-P	OPT.	30,60,90
B1-LKD	STUTT.REIBUNGSMESSER (CH)	LOCKED	RIBBED-P	100	30,60,90
B1-SLP	STUTT.REIBUNGSMESSER (CH)	FIXED SLIP	RIBBED-P	15	30,60,90
B2-LKD	SKIDDOMETER BV-8 (CH)	LOCKED	RIBBED-P	100	30,60,90
B2-SLP	SKIDDOMETER BV-8 (CH)	FIXED SLIP	RIBBED-P	15	30,60,90
B3	SKIDDOMETER BV-11(S)	FIXED SLIP	PATTERN	15	30,60,90
B4E-SLP	NORSEMEETER OSCAR (N)	FIXED SLIP	BLANK-A	15	30,60,90
B4E-SWP	NORSEMEETER OSCAR (N)	VARIABLE SLIP	BLANK-A	0-90	30,60,90
B5-ABS	STUTT.REIBUNGSMESSER (A)	OPTIMUM SLIP	RIBBED-P	OPT.	30,60,90
B5-LKD	STUTT.REIBUNGSMESSER (A)	LOCKED	RIBBED-P	100	30,60,90
B5-SLP	STUTT.REIBUNGSMESSER (A)	FIXED SLIP	RIBBED-P	18	30,60,90
B6-501	ASTM E-274 TRAILER (US)	LOCKED	RIBBED-A	100	65
B6-524	ASTM E-274 TRAILER (US)	LOCKED	BLANK-A	100	30,65,90
B6-CHP	ASTM E-274 TRAILER (US)	DRY PEAK	PATTERN	PEAK	65
B6-ULT	ASTM E-274 TRAILER (US)	DRY LOCKED	BLANK-A	100	10
B7	BRITISH PENDULUM (CH)	SLIDER	BLANK	100	10
B10E	MuMETER	SIDE FORCE	PATTERN	13 (7.5)	80
C1	SKID RESISTANCE TESTER (P)	LOCKED	PATTERN	100	30,60,90
C3B	FLEMISH SCRIM (B)	SIDE FORCE	BLANK	34 (20)	30,60,90
C3E	CEDEX SCRIM (E)	SIDE FORCE	BLANK	34 (20)	30,60,90
C4	KOMATU SKID TESTER (J)	VARIABLE SLIP	BLANK-A	10 30	30,50,90
C5	DWW TRAILER (NL)	FIXED SLIP	BLANK-P	86	30,50,90
C6E	MOPT SCRIM (E)	SIDE FORCE	BLANK	34 (20)	30,60,90
C8	STRADGRAPH (DK)	SIDE FORCE	BLANK-P	21 (12)	30,60,90
C9	WALOON ODOLIOGRAPH (B)	SIDE FORCE	BLANK-P	26 (15)	30,50,90
C10	CRR ODOLIOGRAPH (B)	SIDE FORCE	BLANK-P	34 (20)	30,50,90
D1E	SCRIM (D)	SIDE FORCE	BLANK	34 (20)	40,60,90
D2	GEOCISA SCRIM (E)	SIDE FORCE	BLANK	34 (20)	30,60,80
D3	SCRIM (F)	SIDE FORCE	BLANK	34 (20)	30,60,90
D4	SUMMS (I)	SIDE FORCE	BLANK	34 (20)	30,60,80
D5	SCRIMTEX (UK)	SIDE FORCE	BLANK	34 (20)	30,50,90
D6	LCPC TRAILER (F)	LOCKED	BLANK-P	100	40,60,90
D7B	PETRA (D)	VARIABLE SLIP	PATTERN	0-100	30,60,90
D8	GRIPTESTER (UK)	FIXED SLIP	BLANK	14.5	5,30,65,90

BLANK-P=PIARC smooth tire
BLANK-A=ASTM smooth tire

PATTERN=Tires with various patterns

試験タイヤは BLANK (溝のないタイヤ) と PATTERN (各種の溝形のあるタイヤ) の 2 種類を用いた。

3. 5 DF テスターと他の測定装置との相関分析

3. 5. 1 分析方法

異なる装置間の相関は、それぞれの装置で測定されたデータを用いて測定速度 30 km/h、60 km/h および 90 km/h の 3 種類のそれぞれの速度についての相関係数を計算した。また、直線回帰式を用いて 2 種類の装置間の回帰分析をおこない、測定値の相互変換の可能性を検討した。相関係数および回帰直線はそれぞれ次式で求めた。

$$\text{相関係数} \quad R = S_{XY} / \sqrt{S_{XX}} \sqrt{S_{YY}} \quad (3. 1)$$

ただし、 S_{XY} = X 装置と Y 装置の測定値の共分散

S_{XX} = X 装置の測定値の分散

S_{YY} = Y 装置の測定値の分散

$$\text{回帰直線} \quad Y = a + b X \quad (3. 2)$$

ただし、 $a = Y - b X$

$b = S_{XY} / S_{XX}$

3. 5. 2 DF テスターと他の装置との相関係数

表-3. 2～表-3. 5は、1992年 PIARC の国際共同実験に参加したすべり摩擦測定装置のうち英国式ポータブルテスター (A12とA14) を除くすべての測定装置間の測定速度 30 km/h、60 km/h、90 km/h、および全速度の相関係数をそれぞれ表にして示したものである。この表から PIARC 国際共同実験に参加したすべり抵抗測定装置の相関関係が明らかになる。

次に、DF テスター (A13) と他の測定装置との相関係数を 4 種類の速度グループによる変化を試験タイヤ別に図-3. 4～図-3. 5に示す。DF テスターのゴムスライダーは BLANK タイヤであるが、相関係数が高いのは 30 km/h においてフラン

スの LCPC トレーラ (D6) 0.916、スイスの SUKIDDOMETER の 0.890、ベルギーの WOOLON (C9) の 0.877、アメリカの ASTM トレーラ (B6524) の 0.869 などである。速度 60 km/h ではデンマークの SCRIM (D1E) の 0.895、ベルギーの CRR (C10) の 0.892、ベルギーの WOOLON (C9) の 0.870 などである。速度が 90 km/h になると、ほとんどの装置との相関係数は低くなる傾向にある。全ての速度をプールした場合に最も相関係数が安定しているのはデンマークの SCRIM (D1E) である。

次に、測定方法別に DF テスターと他の装置の相関係数をまとめて、車輪ロック方式について図—3. 6、サイドフォース方式について図—3. 7、スリップ方式について図—3. 8 に示す。測定方法ではサイドフォース方式との相関係数が全般的に高く、スリップ方式は相関係数があまり高くないが安定しており、車輪ロック方式とは相関係数が高いものと低いものがある。

2. 5. 3 DF テスターと他の装置との回帰関係

2つの装置間の相関係数を求めるとともに、両者間の回帰直線式を(3. 2)式で求めた。この場合、DF テスターの値を X にとり、他の装置の値を Y にとっている。また、回帰直線は 30 km/h、60 km/h、90 km/h とすべての速度に対するものの4種類を求めている。得られた結果を図—3. 9 から図—3. 36 に示す。

ここで得られた結果は、与えられた路面のすべり抵抗を DF テスターで測定した場合に、各装置に対する回帰直線を用いて必要な測定速度に対する DF テスターの測定値を他の装置による値に変換することができることになる。

このような関係が得られたのは日本におけるすべり抵抗測定装置では DF テスターが初めてであり、国内で利用されている他の装置について国外の装置と関係づけるためには、DF テスターを媒介として間接的に関係を求める方法しかないのが現状である。この意味で、DF テスターはこのような関係を求めるキャリブレーション装置として利用することが可能である。

表一3. 2 測定速度30km/hに

SPEED		BLANK TIRE									
30		A13	C4	B6524	B1LKD	B5SLP	B6501	B3	B6CHP	B10E	C1
BLANK TIRE	A13										
	C4	0.7734									
	B6524	0.8685	0.7673								
	C3B	0.8314	0.9257	0.7573							
	C3E	0.391	0.6343	0.3614							
	C5	0.7391	0.8153	0.7759	0.6						
	C6E	0.7889	0.6072	0.815							
	C8	0.7118	0.9023	0.6836	0.6						
	C9	0.8777	0.8413	0.8525	0.6						
	C10	0.8476	0.8933	0.8473	0.6						
	D1E	0.8709	0.5904	0.8945							
	D2	0.6132	0.6725	0.5792	0.6						
	D3	0.7473	0.7842	0.7491	0.6						
	D4	0.7884	0.7906	0.7877	0.6						
	D5	0.7517	0.8076	0.7455	0.6						
	D6	0.9159	0.6896	0.9063	0.6						
	D8	0.7234	0.8506	0.8438	0.6						
PATTERN&RIBBED TIRE	B1ABS	0.8122	0.9027	0.8712	0.6						
	B1LKD	0.6522	0.7856	0.7876	0.6						
	B1SLP	0.6481	0.8346	0.7856	0.6						
	B2LKD	0.6112	0.8427	0.5811	0.6						
	B2SLP	0.8902	0.8659	0.8314	0.6						
	B5LKD	0.7624	0.7869	0.7819	0.6						
	B5SLP	0.6779	0.8046	0.679	0.6884						
	B6501										
	B3	0.7823	0.8798	0.8211	0.842	0.8781					
	B6CHP										
	B10E										
	C1	0.7535	0.8251	0.8755	0.3522	0.8415		0.8975			

表一3. 3 測定速度60km/hに

SPEED		BLANK TIRE									
60		A13	C4	B6524	B1LKD	B5SLP	B6501	B3	B6CHP	B10E	C1
BLANK TIRE	A13										
	C4	0.7946									
	B6524	0.7828	0.6872								
	C3B	0.8033	0.9372	0.5182							
	C3E	0.4698	0.5629	0.5562							
	C5	0.7915	0.7935	0.7539	0.6						
	C6E	0.8496	0.7764	0.8089							
	C8	0.7877	0.8697	0.7422	0.6						
	C9	0.8698	0.6812	0.8141	0.6						
	C10	0.892	0.807	0.9081	0.6						
	D1E	0.895	0.6768	0.7937							
	D2	0.704	0.7029	0.5367	0.6						
	D3	0.7654	0.8024	0.6205	0.6						
	D4	0.8174	0.8052	0.7816	0.6						
	D5	0.7721	0.8083	0.7155	0.6						
	D6	0.839	0.5905	0.8912	0.6						
	D8	0.7987	0.7767	0.8532	0.6						
PATTERN&RIBBED TIRE	B1ABS	0.8586	0.7973	0.6116	0.6						
	B1LKD	0.7555	0.8026	0.747	0.6						
	B1SLP	0.5765	0.7686	0.7151	0.6						
	B2LKD	0.5366	0.6062	0.2943	0.6						
	B2SLP	0.8332	0.8981	0.5946	0.6						
	B5LKD	0.768	0.6793	0.6941	0.6						
	B5SLP	0.7792	0.8065	0.6163	0.9502						
	B6501	0.7613	0.7274	0.8168	0.9618	0.7794					
	B3	0.8397	0.881	0.7742	0.9006	0.8829	0.8237				
	B6CHP	0.1428	0.2076		0.3048	0.2573	0.3336	0.2672			
	B10E										
	C1	0.8463	0.7691	0.87	0.8096	0.8062	0.8509	0.8847	0.3236		

表一3. 2 測定速度30km/hにおける全測定装置間の相関

SPEED		BLANK TIRE															
30		A13	C4	B6524	C3B	C3E	C5	C6E	C8	C9	C10	D1E	D2	D3	D4	D5	D6
BLANK TIRE	A13																
	C4	0.7734															
	B6524	0.8685	0.7673														
	C3B	0.8314	0.9257	0.7573													
	C3E	0.391	0.6343	0.3614													
	C5	0.7391	0.8153	0.7759	0.8868	0.364											
	C6E	0.7889	0.6072	0.815		0.6416	0.5809										
	C8	0.7118	0.9023	0.6836	0.9025	0.6047	0.7926	0.4533									
	C9	0.8777	0.8413	0.8525	0.8754	0.4563	0.7809	0.7724	0.8242								
	C10	0.8476	0.8933	0.8473	0.8808	0.504	0.8715	0.8294	0.8697	0.9398							
	D1E	0.8709	0.5904	0.8945		0.4418	0.6851	0.8329	0.5264	0.8814	0.8916						
	D2	0.6132	0.6725	0.5792	0.8364	0.6017	0.6747	0.8255	0.7235	0.7323	0.7327	0.821					
	D3	0.7473	0.7842	0.7491	0.9278	0.5434	0.8385	0.8436	0.7943	0.8478	0.8674	0.9183	0.8358				
	D4	0.7884	0.7906	0.7877	0.8745	0.5034	0.8169	0.8849	0.7094	0.7934	0.8314	0.8962	0.7896	0.8488			
	D5	0.7517	0.8076	0.7455	0.8814	0.6102	0.76	0.8272	0.7609	0.8311	0.83	0.7226	0.781	0.8017	0.8877		
	D6	0.9159	0.6896	0.9063	0.6784	0.4285	0.6861	0.8829	0.6131	0.812	0.7914	0.9039	0.5518	0.7181	0.7808	0.749	
	D8	0.7234	0.8506	0.8438	0.8922	0.4402	0.8568	0.6498	0.8762	0.842	0.8827	0.7382	0.7266	0.8411	0.7856	0.7399	0.697
PATTERN&RIBBED TIRE	B1ABS	0.8122	0.9027	0.8712	0.8006	0.8098	0.7967	0.7805	0.8057	0.9143	0.8999	0.9355	0.5722	0.769	0.6997	0.8545	0.818
	B1LKD	0.6522	0.7856	0.7876	0.6526	0.7238	0.8382	0.7738	0.7724	0.7511	0.817	0.8893	0.7087	0.7734	0.7926	0.7476	0.625
	B1SLP	0.6481	0.8346	0.7856	0.7246	0.7138	0.8179	0.6989	0.8663	0.7534	0.8472	0.825	0.7401	0.7833	0.7885	0.7641	0.571
	B2LKD	0.6112	0.8427	0.5811	0.6575	0.6153	0.5338	0.7975	0.7823	0.6398	0.7051	0.8721	0.6925	0.7652	0.5889	0.5986	0.60
	B2SLP	0.8902	0.8659	0.8314	0.8721	0.5461	0.6979	0.7562	0.8106	0.8866	0.9013	0.8515	0.6652	0.793	0.7473	0.8083	0.814
	B5LKD	0.7624	0.7869	0.7819	0.8282	0.629	0.8143	0.8369	0.7869	0.8453	0.8988	0.8146	0.743	0.8643	0.8129	0.8104	0.745
	B5SLP	0.6779	0.8046	0.679	0.8166	0.6093	0.7312	0.6992	0.8152	0.7947	0.8313	0.7921	0.7563	0.8257	0.7865	0.7891	0.630
	B6501																
	B3	0.7823	0.8798	0.8211	0.8721	0.5461	0.786	0.7562	0.8106	0.8866	0.9013	0.8515	0.6652	0.793	0.7473	0.8083	0.718
	B6CHP																
	B10E																
	C1	0.7535	0.8251	0.8755	0.8624	0.4213	0.8694	0.7297	0.7785	0.8962	0.8923	0.9186	0.6586	0.8623	0.8181	0.763	0.788

表一3. 3 測定速度60km/hにおける全測定装置間の相関

SPEED		BLANK TIRE															
60		A13	C4	B6524	C3B	C3E	C5	C6E	C8	C9	C10	D1E	D2	D3	D4	D5	D6
BLANK TIRE	A13																
	C4	0.7946															
	B6524	0.7828	0.6872														
	C3B	0.8033	0.9372	0.5182													
	C3E	0.4698	0.5629	0.5562													
	C5	0.7915	0.7935	0.7539	0.8755	0.3248											
	C6E	0.8496	0.7764	0.8089		0.7736	0.664										
	C8	0.7877	0.8697	0.7422	0.8706	0.5982	0.8408	0.8269									
	C9	0.8698	0.6812	0.8141	0.7937	0.6756	0.7237	0.888	0.8355								
	C10	0.892	0.807	0.9081	0.8521	0.6416	0.8364	0.8818	0.9088	0.9421							
	D1E	0.895	0.6768	0.7937		0.5087	0.7256	0.8847	0.8102	0.859	0.8189						
	D2	0.704	0.7029	0.5367	0.8086	0.6364	0.6947	0.8971	0.7303	0.7547	0.7342	0.9014					
	D3	0.7654	0.8024	0.6205	0.9187	0.6452	0.8202	0.9208	0.812	0.7342	0.7927	0.926	0.8037				
	D4	0.8174	0.8052	0.7816	0.8897	0.5656	0.8795	0.8978	0.8653	0.8215	0.8844	0.9419	0.8055	0.8825			
	D5	0.7721	0.8083	0.7155	0.8944	0.7333	0.8181	0.8767	0.8423	0.8147	0.86	0.8439	0.7954	0.8693	0.8898		
	D6	0.839	0.5905	0.8912	0.5087	0.6044	0.6772	0.8884	0.6548	0.8503	0.8943	0.8609	0.5936	0.5581	0.7183	0.6779	
	D8	0.7987	0.7767	0.8532	0.8578	0.4753	0.8464	0.7774	0.879	0.8601	0.8993	0.7943	0.716	0.8123	0.8786	0.8181	0.768
PATTERN&RIBBED TIRE	B1ABS	0.8586	0.7973	0.6116	0.802	0.6471	0.9115	0.9046	0.8627	0.7082	0.7128	0.8332	0.7725	0.8569	0.8308	0.8197	0.54
	B1LKD	0.7555	0.8026	0.747	0.9064	0.6502	0.8993	0.9025	0.8476	0.7338	0.8337	0.8492	0.7399	0.8909	0.8909	0.8655	0.572
	B1SLP	0.5765	0.7686	0.7151	0.7683	0.5667	0.8062	0.8034	0.8199	0.6468	0.8389	0.8468	0.674	0.7407	0.8307	0.7669	0.499
	B2LKD	0.5366	0.6062	0.2943	0.7096	0.1253	0.5706	0.3901	0.5973	0.3373	0.5353	0.3816	0.3926	0.673	0.5154	0.5561	0.207
	B2SLP	0.8332	0.8981	0.5946	0.8751	0.4645	0.7564	0.7857	0.8501	0.8183	0.8367	0.832	0.7487	0.7973	0.8359	0.8402	0.673
	B5LKD	0.768	0.6793	0.6941	0.8433	0.4554	0.8663	0.8203	0.8591	0.7189	0.819	0.8579	0.7399	0.8439	0.8293	0.7751	0.579
	B5SLP	0.7792	0.8065	0.6163	0.8606	0.5271	0.8307	0.8482	0.8626	0.7337	0.8618	0.8198	0.8258	0.8476	0.8117	0.8169	0.534
	B6501	0.7613	0.7274	0.8168	0.8651	0.5451	0.8093	0.7932	0.7829	0.7075	0.8296	0.857	0.6777	0.8799	0.8224	0.7876	0.583
	B3	0.8397	0.881	0.7742	0.8751	0.4645	0.8661	0.7857	0.8501	0.8183	0.8367	0.832	0.7487	0.7973	0.8359	0.8402	0.643
	B6CHP	0.1428	0.2076		0.0424	0.4487	0.2929	0.3479	0.3126	0.086	0.1533	0.1449	0.02	0.2857	0.2657	0.2795	0.03
	B10E																
	C1	0.8463	0.7691	0.87	0.7764	0.4965	0.8901	0.8657	0.8564	0.8021	0.883	0.8182	0.6371	0.825	0.8964	0.7988	0.720

表-3. 4 測定速度90km/h

SPEED		BLANK TIRE									
90		A13	C4	B6SLP	B5LKD	B5SLP	B6501	B3	B6CHP	B10E	C1
BLANK TIRE	A13										
	C4										
	B6524	0.699									
	C3B	0.8267		0.6							
	C3E	0.6053		0.7							
	C5	0.6668		0.7							
	C6E	0.7556		0.7							
	C8	0.7137		0.7							
	C9	0.5745		0.8							
	C10	0.6391		0.8							
	D1E	0.8377		0.8							
	D2	0.8335		0.6							
	D3	0.7089		0.6							
	D4	0.6978		0.7							
	D5	0.6756		0.8							
	D6	0.5427		0.8							
PATTERN&RIBBED TIRE	D8	0.7897		0.8							
	B1ABS	0.6739		0.6							
	B1LKD	0.6835		0.7							
	B1SLP	0.6484		0.7							
	B2LKD	0.5078		0.3							
	B2SLP	0.7905		0.5							
	B5LKD	0.8532		0.8447							
	B5SLP	0.7814		0.6916	0.8665						
	B6501										
	B3	0.8299		0.7963	0.8301	0.9262					
	B6CHP										
	B10E	0.9489		0.9029	0.8981	0.8459		0.9159			
	C1	0.8243		0.9911	0.8299	0.831		0.8762		0.9329	

表-3. 5 全ての速度に

SPEED		BLANK TIRE									
ALL		A13	C4	B6SLP	B5LKD	B5SLP	B6501	B3	B6CHP	B10E	C1
BLANK TIRE	A13										
	C4	0.7819									
	B6524	0.7574	0.7081								
	C3B	0.7791	0.9287	0.6							
	C3E	0.449	0.6129	0.7							
	C5	0.7201	0.808	0.8							
	C6E	0.7814	0.7197	0.7							
	C8	0.7323	0.8848	0.7							
	C9	0.7656	0.7467	0.7							
	C10	0.7688	0.8331	0.8							
	D1E	0.8502	0.6541	0.8							
	D2	0.6782	0.6926	0.6							
	D3	0.7515	0.7839	0.7							
	D4	0.7884	0.8034	0.8							
	D5	0.7397	0.8131	0.7							
	D6	0.7635	0.643	0.9							
PATTERN&RIBBED TIRE	D8	0.7519	0.8182	0.8							
	B1ABS	0.7563	0.8364	0.7							
	B1LKD	0.6551	0.7852	0.8							
	B1SLP	0.6332	0.8038	0.7							
	B2LKD	0.5834	0.713	0.6							
	B2SLP	0.8322	0.8809	0.7							
	B5LKD	0.6833	0.6931	0.8047							
	B5SLP	0.7279	0.8077	0.7899	0.8777						
	B6501	0.7613	0.7274	0.8474	0.8618	0.7794					
	B3	0.801	0.8832	0.8202	0.8138	0.907	0.8237				
	B6CHP	0.1428	0.2076	0.716	0.3048	0.2573	0.3336	0.2672			
	B10E	0.9489		0.9029	0.8981	0.8459		0.9159			
	C1	0.7349	0.7874	0.9086	0.8587	0.8558	0.8509	0.8915	0.3236	0.9329	

表一3. 4 測定速度90km/hにおける全測定装置間の相関

SPEED		BLANK TIRE														
90		A13	C4	B6524	C3B	C3E	C5	C6E	C8	C9	C10	D1E	D2	D3	D4	D5
BLANK TIRE	A13															
	C4															
	B6524	0.699														
	C3B	0.8267		0.6367												
	C3E	0.6053		0.7721												
	C5	0.6668		0.885	0.7891	0.6321										
	C6E	0.7556		0.7968		0.8683	0.7087									
	C8	0.7137		0.7553	0.8405	0.7109	0.8711	0.7994								
	C9	0.5745		0.8675	0.4403	0.7359	0.7882	0.8089	0.7422							
	C10	0.6391		0.8753	0.5415	0.7852	0.8563	0.8342	0.825	0.8845						
	D1E	0.8377		0.8089		0.7858	0.8057	0.92	0.8857	0.8746	0.7979					
	D2	0.8335		0.6475	0.7865	0.6807	0.628	0.7979	0.769	0.6071	0.6225	0.8835				
	D3	0.7089		0.6131	0.9476	0.8171	0.6872	0.9048	0.7109	0.4802	0.5438	0.9083	0.7262			
	D4	0.6978		0.7894	0.9187	0.7259	0.8578	0.8788	0.8482	0.5736	0.7767	0.8809	0.7812	0.9372		
	D5	0.6756		0.8678	0.8332	0.7776	0.8862	0.8239	0.8696	0.7995	0.8458	0.9073	0.7485	0.8525	0.8998	
PATTERN&RIBBED TIRE	D6	0.5427		0.911	0.4351	0.7175	0.7695	0.847	0.666	0.8795	0.8379	0.8241	0.5917	0.3831	0.5318	0.7312
	D8	0.7897		0.8829	0.7528	0.738	0.8982	0.8434	0.8545	0.8109	0.889	0.8096	0.6905	0.7438	0.8542	0.8984
	B1ABS	0.6739		0.6455	0.5844	0.6173	0.7856	0.6845	0.6899	0.6224	0.6412	0.6818	0.581	0.7329	0.6536	0.8396
	B1LKD	0.6835		0.7864	0.7194	0.7233	0.8239	0.8111	0.6985	0.5887	0.7288	0.8212	0.5619	0.7714	0.81	0.8141
	B1SLP	0.6484		0.7567	0.7614	0.6294	0.8409	0.7483	0.7924	0.5428	0.7219	0.8501	0.619	0.7629	0.858	0.8526
	B2LKD	0.5078		0.3451	0.7462	0.672	0.4923	0.7436	0.5839	0.151	0.3053	0.7542	0.579	0.7137	0.8461	0.8356
	B2SLP	0.7905		0.5566	0.9233	0.5698	0.6925	0.6622	0.799	0.5185	0.5706	0.7528	0.7598	0.8622	0.8411	0.8896
	B5LKD	0.8532		0.8005	0.8141	0.6676	0.8562	0.8535	0.8536	0.6688	0.7727	0.8919	0.7417	0.8484	0.8609	0.8602
	B5SLP	0.7814		0.6875	0.8696	0.6161	0.7983	0.7319	0.7876	0.5185	0.721	0.8518	0.7353	0.868	0.8939	0.9022
	B6501															
	B3	0.8299		0.7549	0.9233	0.5698	0.821	0.6622	0.799	0.5185	0.5706	0.7528	0.7598	0.8622	0.8411	0.8896
	B6CHP															
	B10E	0.9489				0.9131	0.3309	0.961	0.6833	0.3892	0.5304	0.9682	0.9792	0.8409	0.681	0.9043
	C1	0.8243		0.9028	0.8065	0.7773	0.9121	0.9231	0.7535	0.6868	0.8301	0.8891	0.6563	0.8202	0.878	0.8777

表一3. 5 全ての速度における全測定装置間の相関

SPEED		BLANK TIRE														
ALL		A13	C4	B6524	C3B	C3E	C5	C6E	C8	C9	C10	D1E	D2	D3	D4	D5
BLANK TIRE	A13															
	C4	0.7819														
	B6524	0.7574	0.7081													
	C3B	0.7791	0.9287	0.6706												
	C3E	0.449	0.6129	0.7029												
	C5	0.7201	0.808	0.8233	0.8672	0.5922										
	C6E	0.7814	0.7197	0.7839		0.7771	0.6548									
	C8	0.7323	0.8848	0.7654	0.8908	0.7262	0.8557	0.7115								
	C9	0.7656	0.7467	0.855	0.743	0.7328	0.8246	0.8053	0.8286							
	C10	0.7688	0.8331	0.8974	0.7951	0.7599	0.8755	0.816	0.882	0.9344						
	D1E	0.8502	0.6541	0.8243		0.6425	0.7641	0.883	0.776	0.878	0.8326					
	D2	0.6782	0.6926	0.6974	0.8394	0.7781	0.7567	0.8683	0.7959	0.7721	0.7815	0.8943				
	D3	0.7515	0.7839	0.7356	0.9347	0.7587	0.8199	0.8661	0.8177	0.7374	0.7808	0.9218	0.8501			
	D4	0.7884	0.8034	0.8003	0.9056	0.6881	0.8493	0.892	0.8209	0.7723	0.832	0.9232	0.831	0.8957		
	D5	0.7397	0.8131	0.7868	0.8868	0.765	0.8481	0.8197	0.8439	0.8466	0.8624	0.8421	0.8237	0.8603	0.8945	
	D6	0.7635	0.643	0.9122	0.6188	0.7145	0.7778	0.8313	0.7241	0.8936	0.888	0.864	0.6962	0.6452	0.7372	0.775
	D8	0.7519	0.8182	0.8722	0.8654	0.6842	0.881	0.7637	0.8873	0.8671	0.8945	0.8157	0.7824	0.8408	0.8538	0.845
PATTERN&RIBBED TIRE	B1ABS	0.7563	0.8764	0.7261	0.8129	0.6626	0.8627	0.76	0.8268	0.7601	0.7717	0.8069	0.7946	0.8123	0.7904	0.8709
	B1LKD	0.6551	0.7852	0.8196	0.7989	0.7459	0.8875	0.7471	0.8155	0.771	0.8428	0.8115	0.7812	0.8322	0.8412	0.8331
	B1SLP	0.6332	0.8038	0.7759	0.7995	0.6805	0.8399	0.7652	0.8416	0.7002	0.8236	0.8518	0.7461	0.7962	0.8482	0.8221
	B2LKD	0.5834	0.713	0.6128	0.7557	0.6263	0.6618	0.6979	0.7336	0.5192	0.6398	0.7237	0.6762	0.7684	0.6832	0.7226
	B2SLP	0.8322	0.8809	0.7176	0.9065	0.6075	0.7714	0.7727	0.8519	0.7606	0.797	0.8421	0.788	0.8535	0.8471	0.8713
	B5LKD	0.6833	0.6931	0.821	0.7937	0.721	0.8687	0.7443	0.8522	0.7831	0.8478	0.7847	0.8027	0.8488	0.8128	0.8203
	B5SLP	0.7279	0.8077	0.7302	0.8777	0.6871	0.8273	0.7622	0.8509	0.7355	0.83	0.8362	0.8403	0.8765	0.8489	0.8677
	B6501	0.7613	0.7274	0.8168	0.8651	0.5451	0.8093	0.7932	0.7829	0.7075	0.8296	0.857	0.6777	0.8799	0.8224	0.7876
	B3	0.801	0.8832	0.8047	0.9065	0.6075	0.8362	0.7727	0.8519	0.7606	0.797	0.8421	0.788	0.8535	0.8471	0.8713
	B6CHP	0.1428	0.2076		0.0424	0.4487	0.2929	0.3479	0.3126	0.086	0.1533	0.1449	0.02	0.2857	0.2657	0.2795
	B10E	0.9489				0.9131	0.3309	0.961	0.6833	0.3892	0.5304	0.9682	0.9792	0.8409	0.681	0.9043
	C1	0.7349	0.7874	0.9023	0.8258	0.7123	0.9038	0.7699	0.8202	0.8327	0.8816	0.8349	0.7609	0.8553	0.8742	0.837

[illegible]

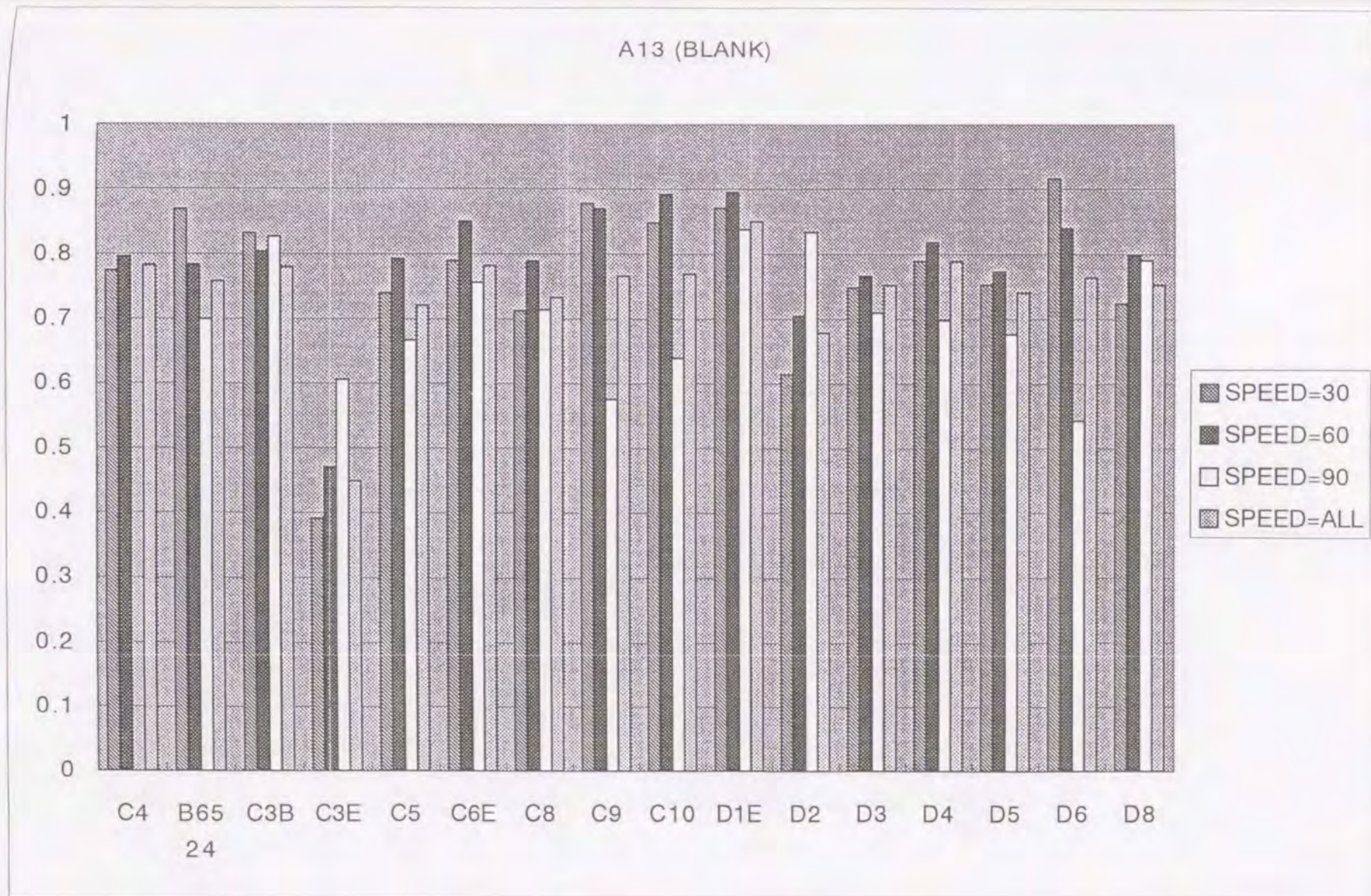
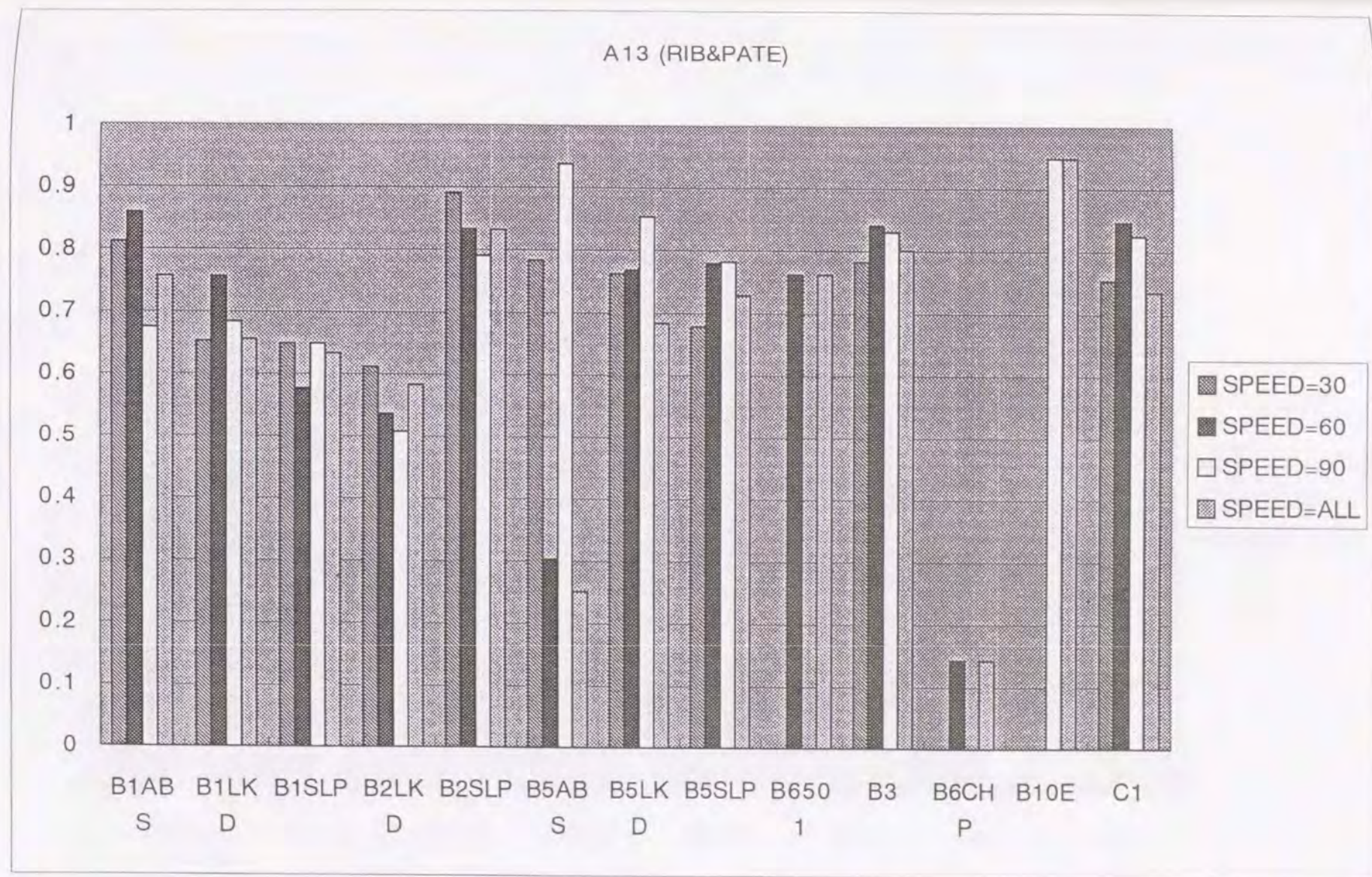


図-3. 4 DF テスターと BLANK 試験タイヤ使用装置の相関係数



図一3. 5 DF テスターと RIB&PATTRN 試験タイヤ使用装置の相関係数

A13 (LOCK)

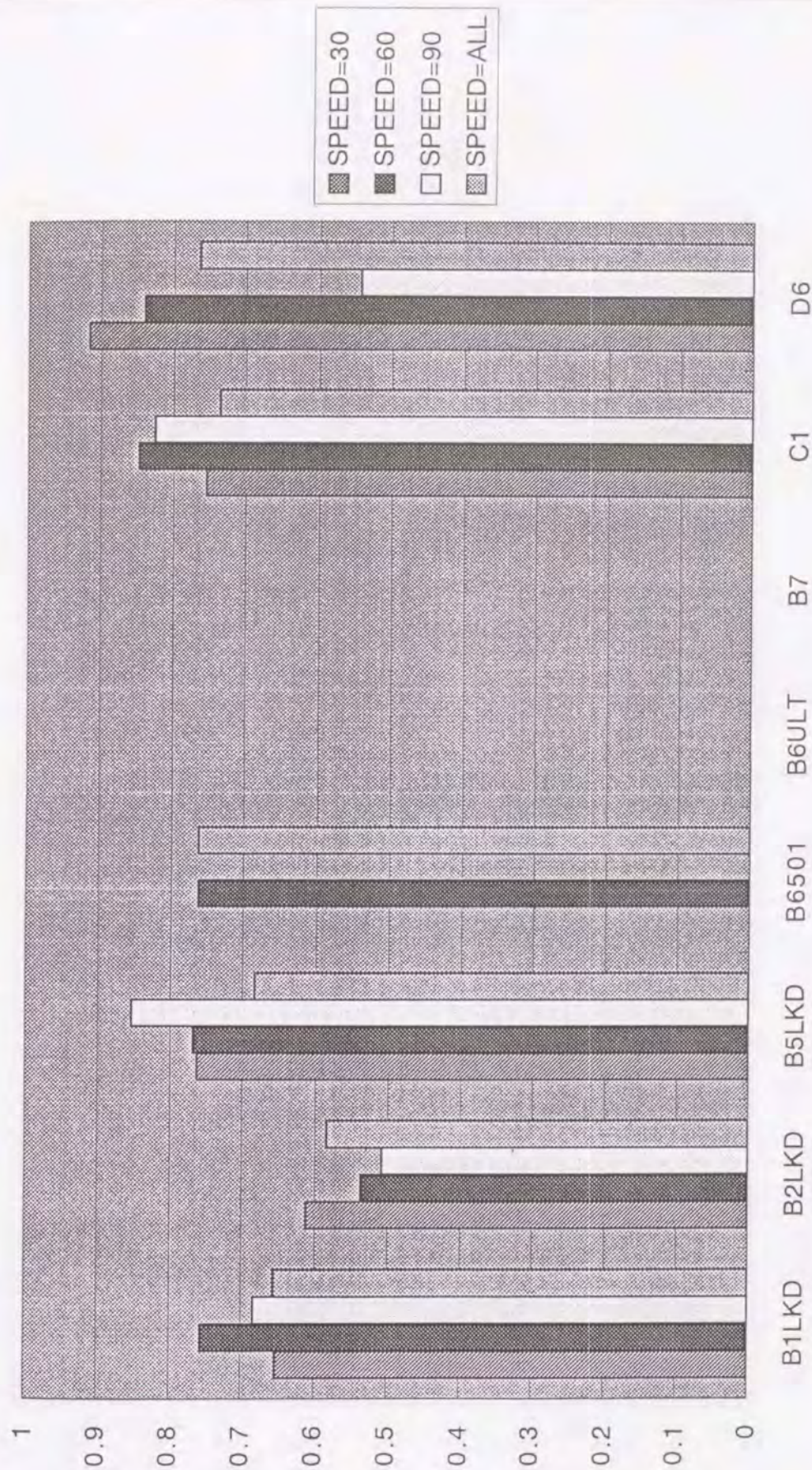


図-3. 6 DF デスターと車輪ロック方式装置の相関係数

A13 (SIDE)

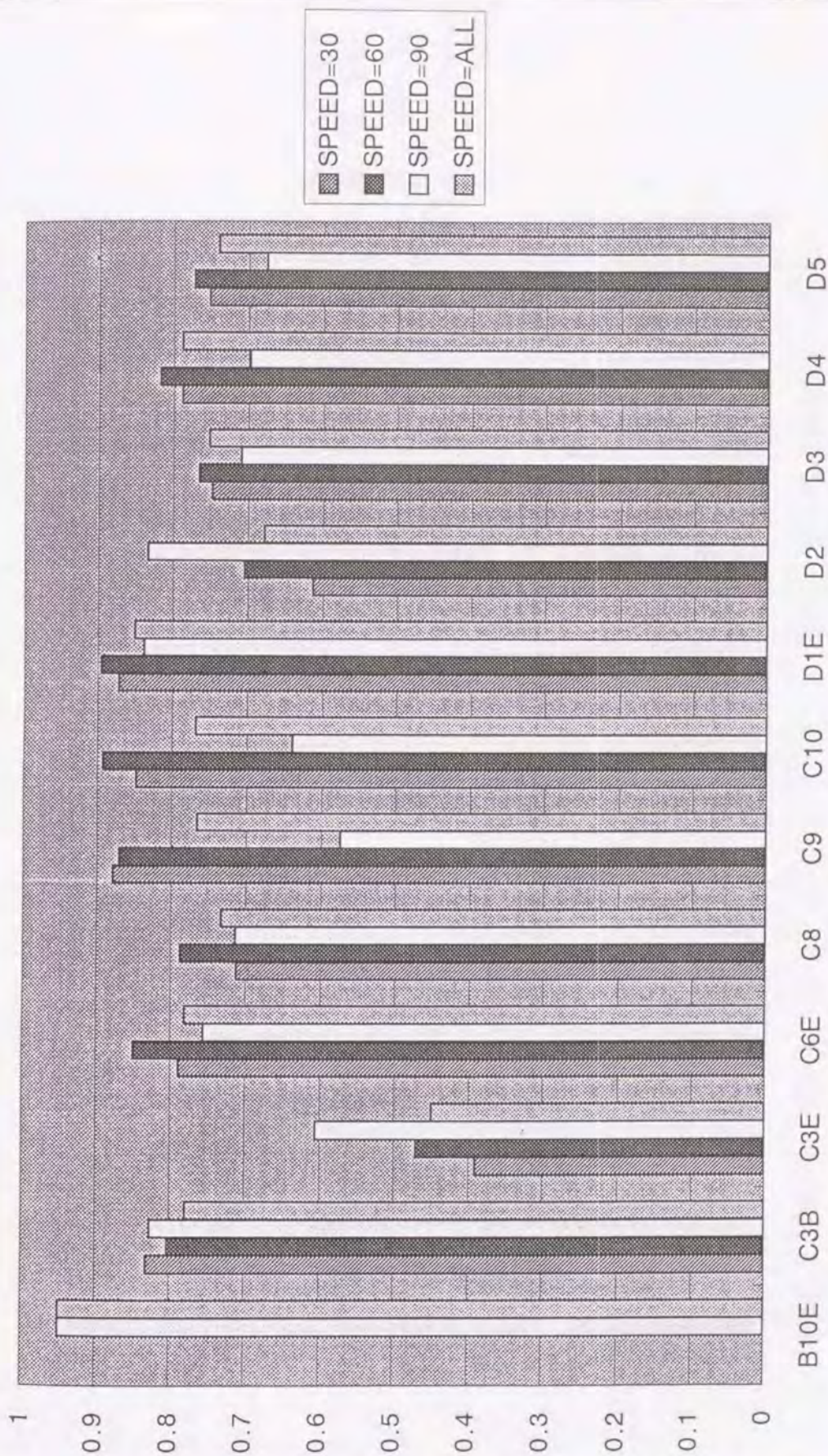


図-3. 7 DF テスターとサイドフォース方式装置の相関係数

A13 (SLIP)

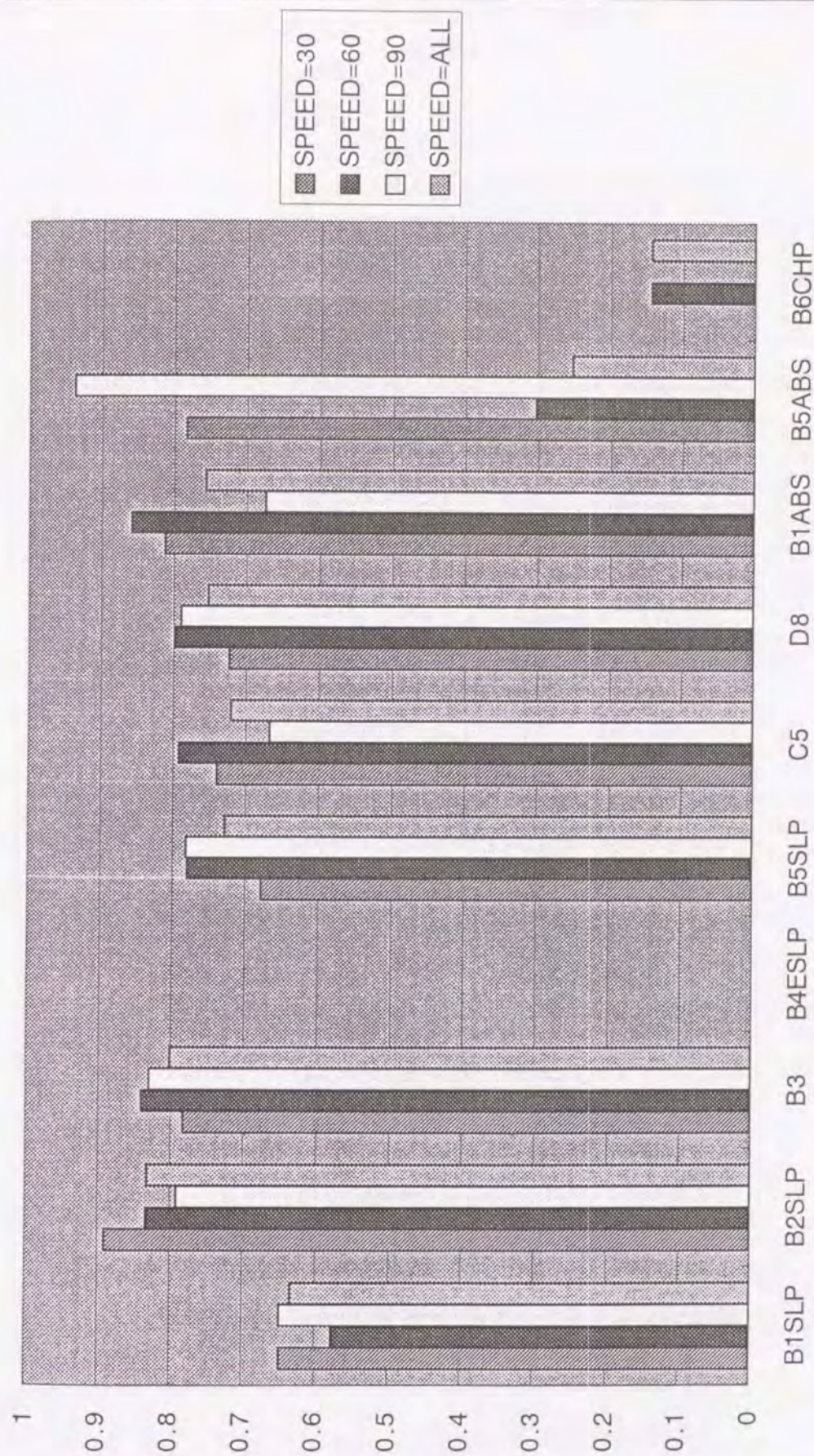
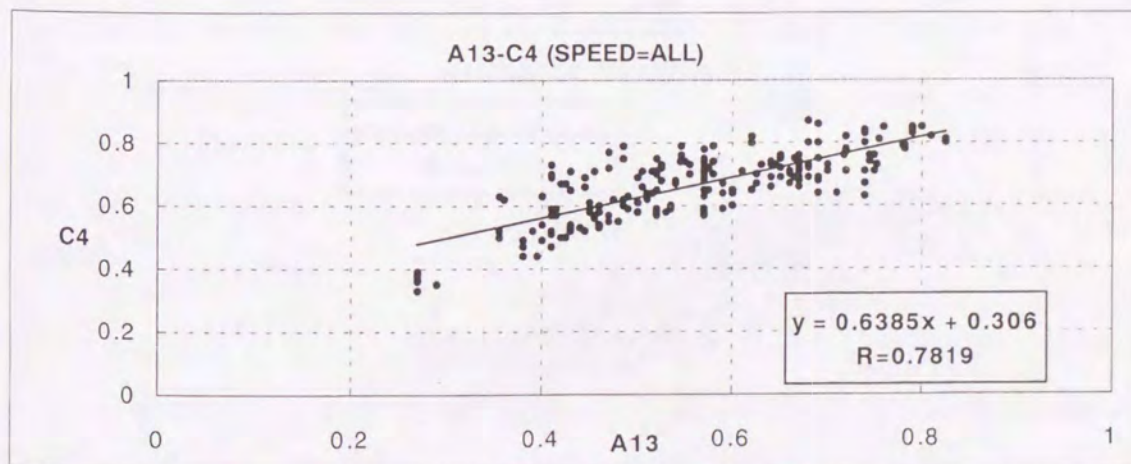
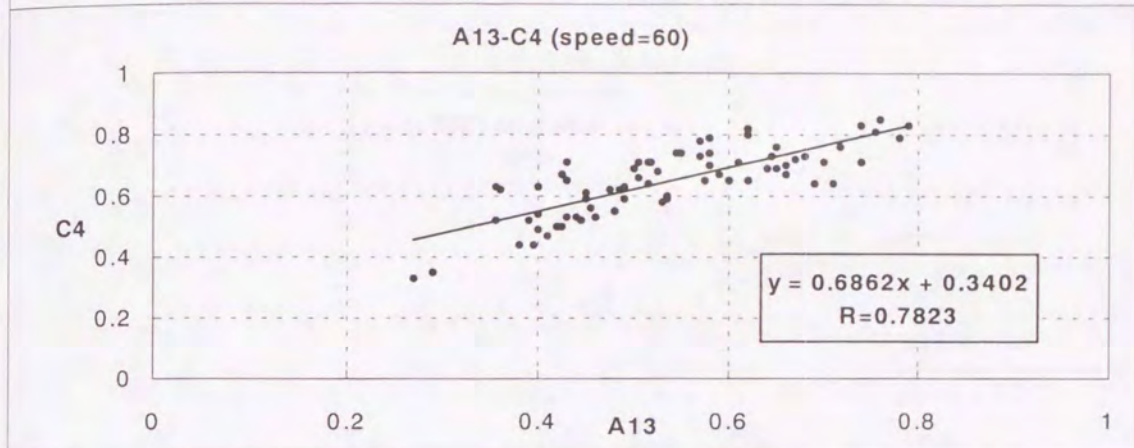
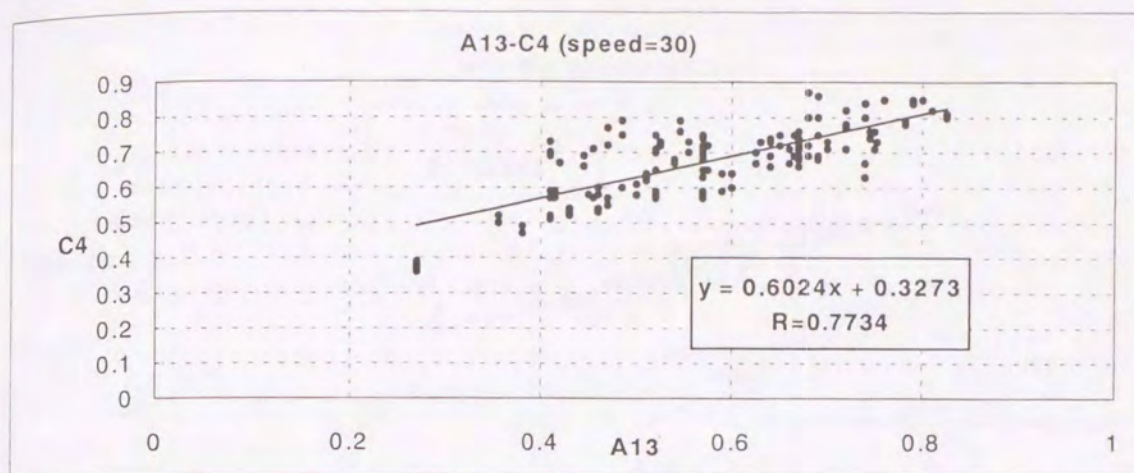
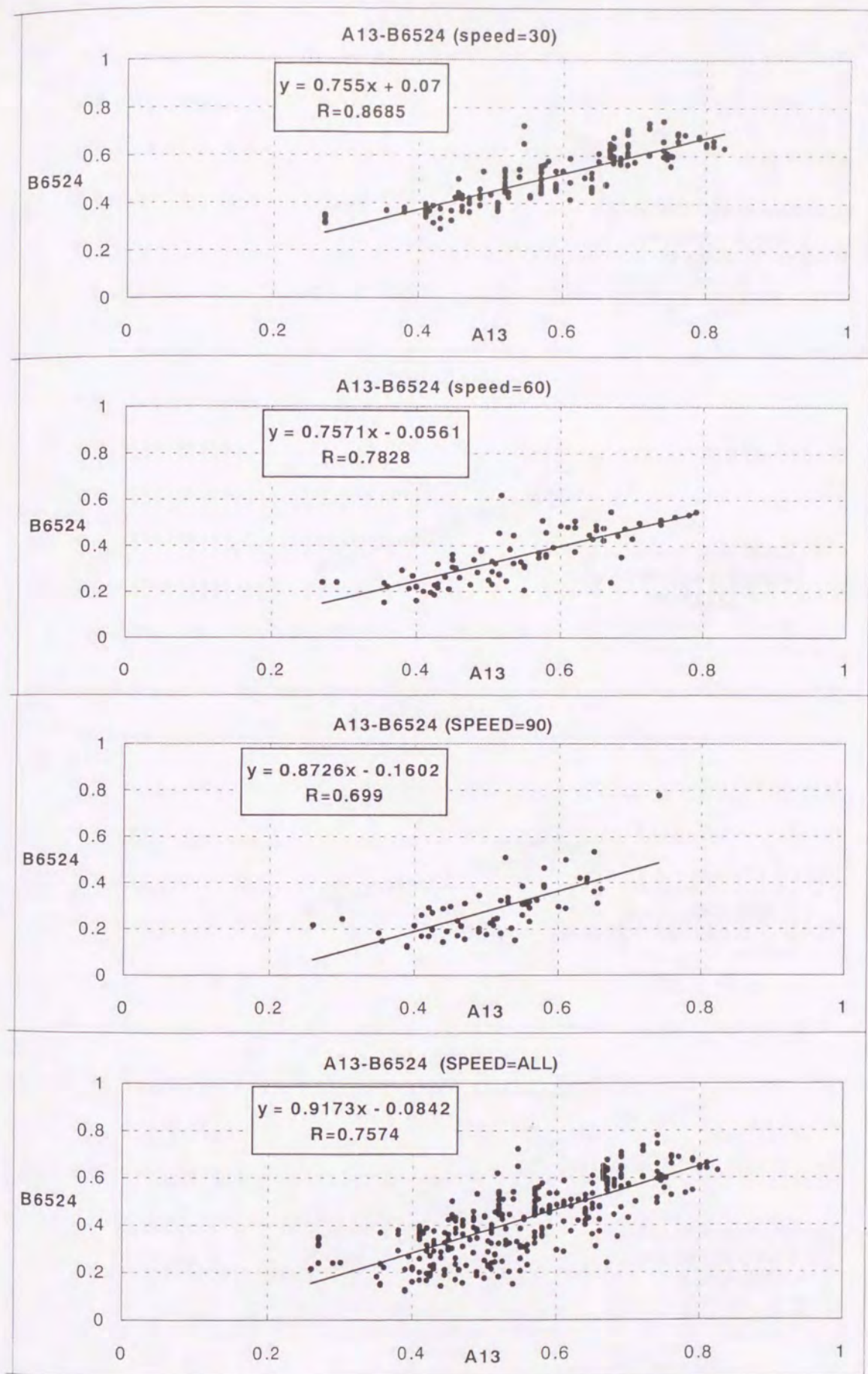


図-3. 8 DF テスターとスリップ方式装置の相関係数



図一3. 9 DF テスター (A13) と C4 における測定速度別の相関図



図一3. 10 DF テスター (A13) と B6524 における測定速度別の相関図

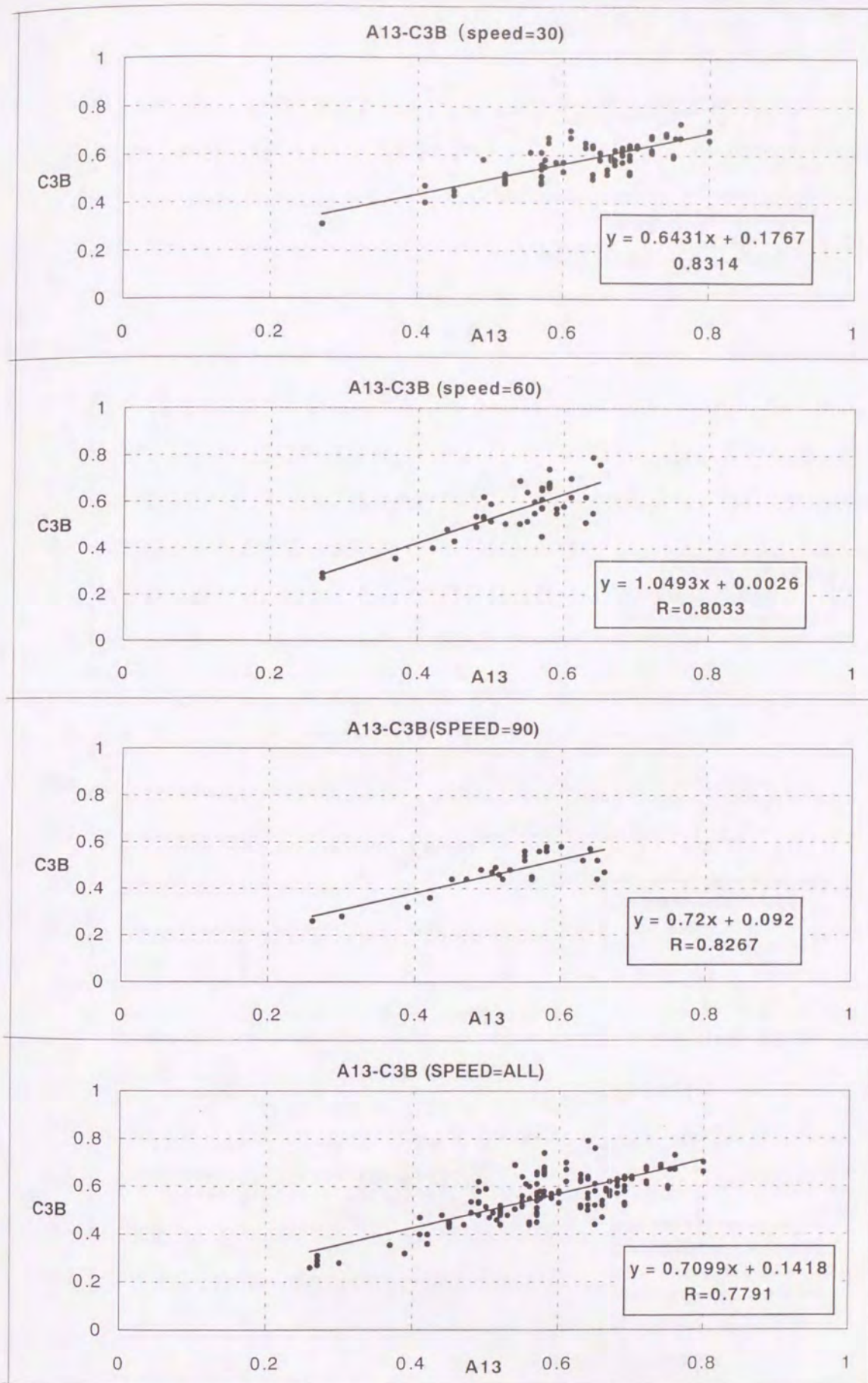


図-3. 11 DF テスター (A13) と C3B における測定速度別の相関図

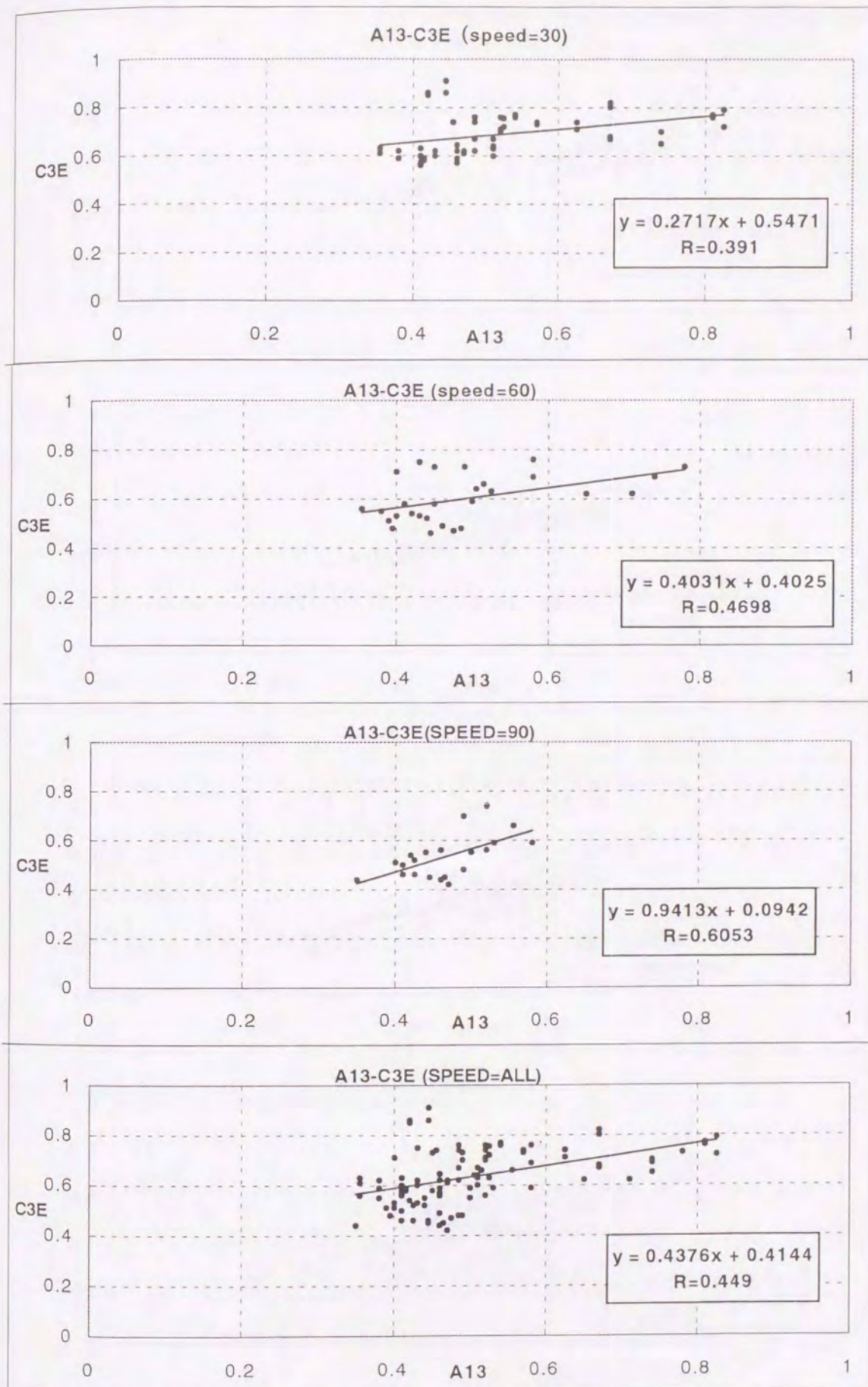


図-3. 12 DF テスター (A13) と C3E における測定速度別の相関図

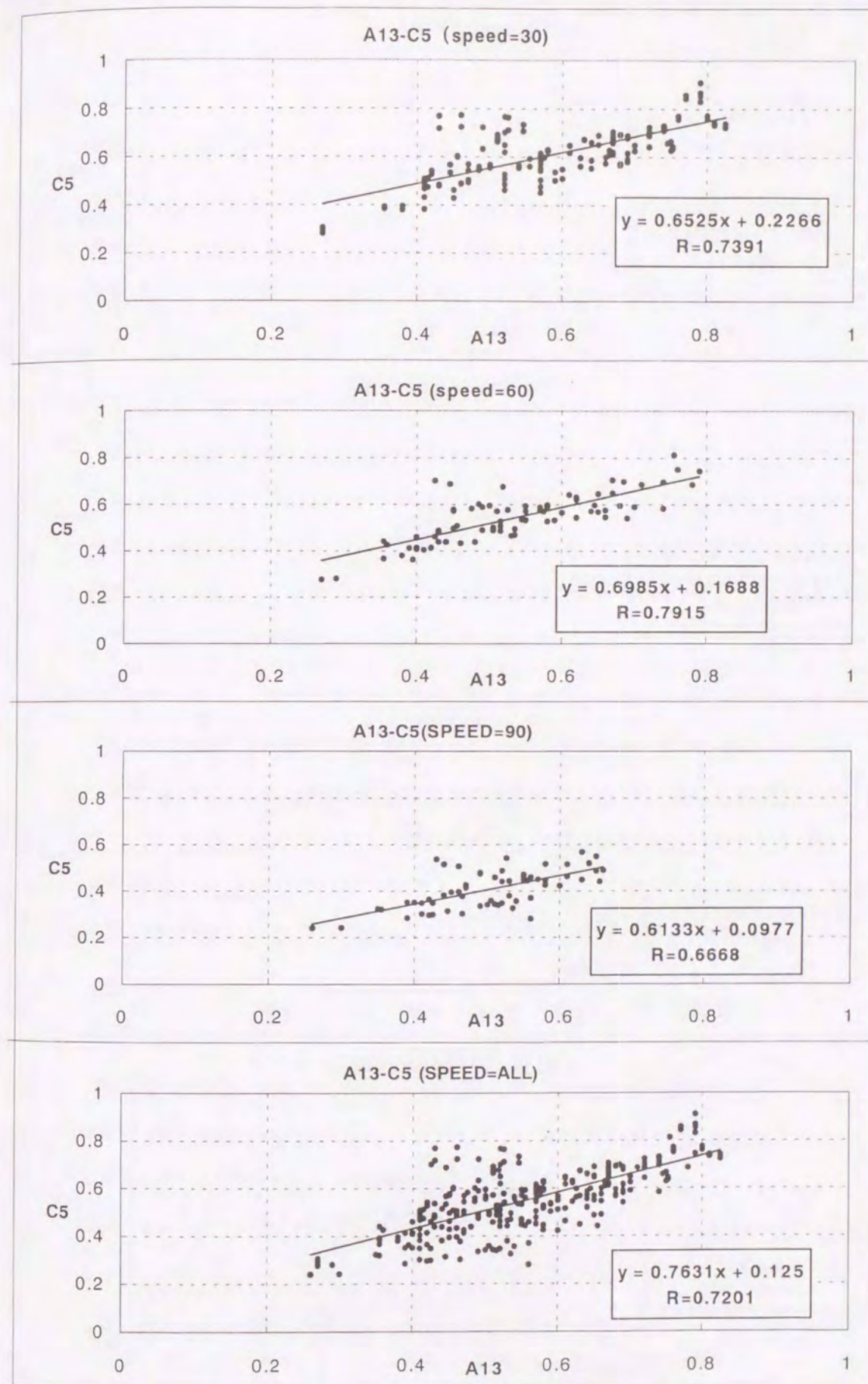


図-3. 13 DF テスター (A13) と C5 における測定速度別の相関図

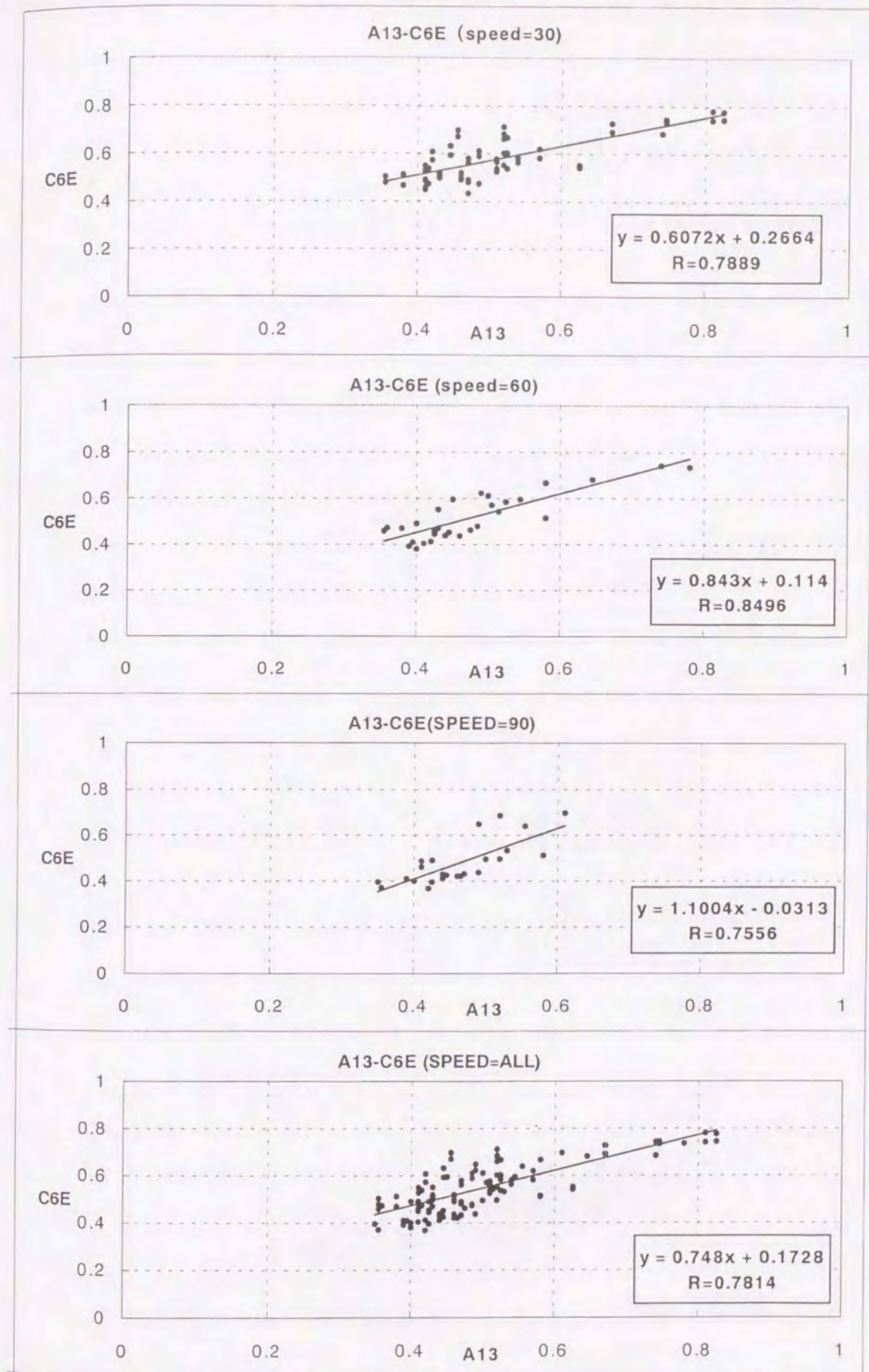


図-3. 14 DF テスター (A13) と C6E における測定速度別の相関図

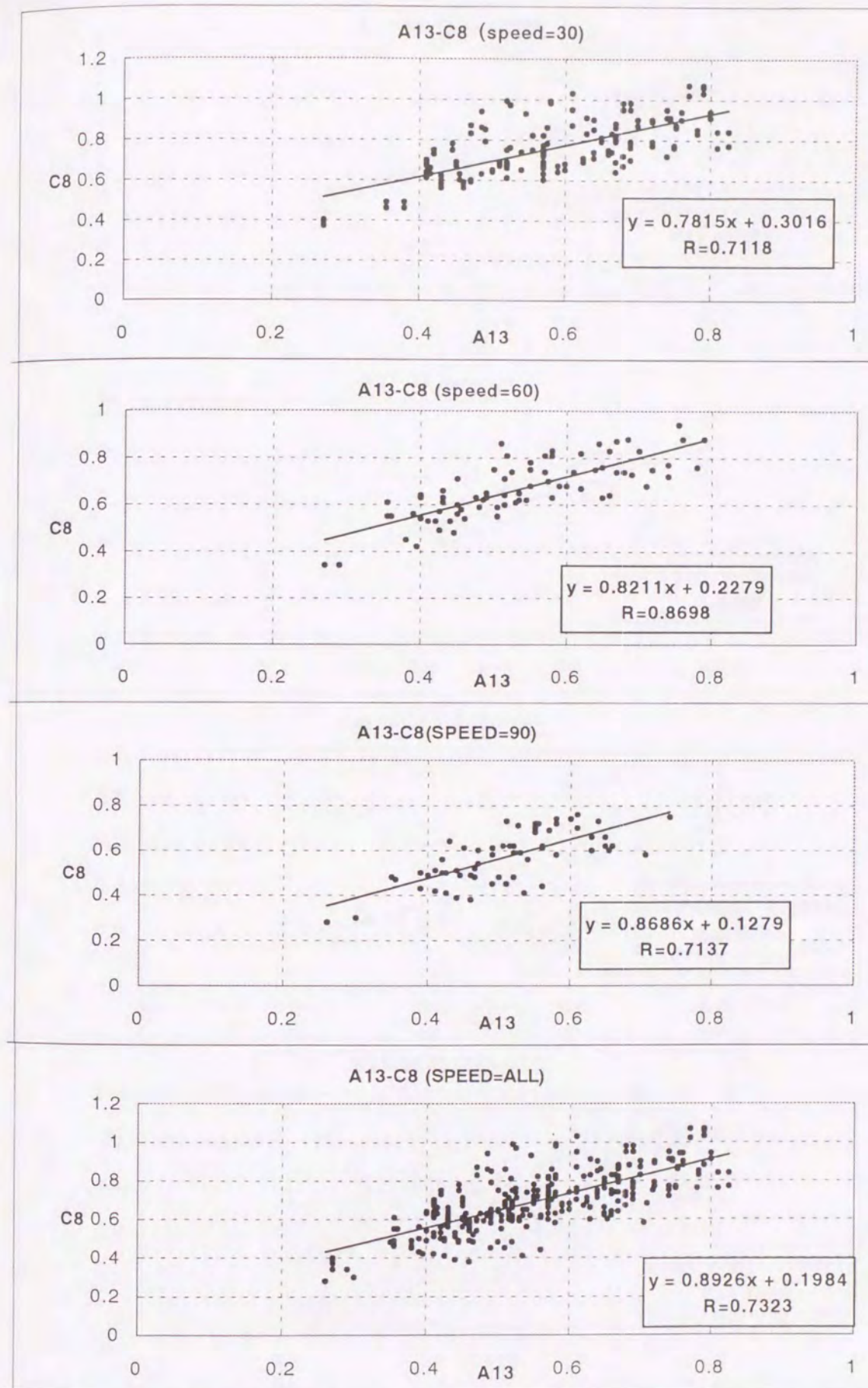
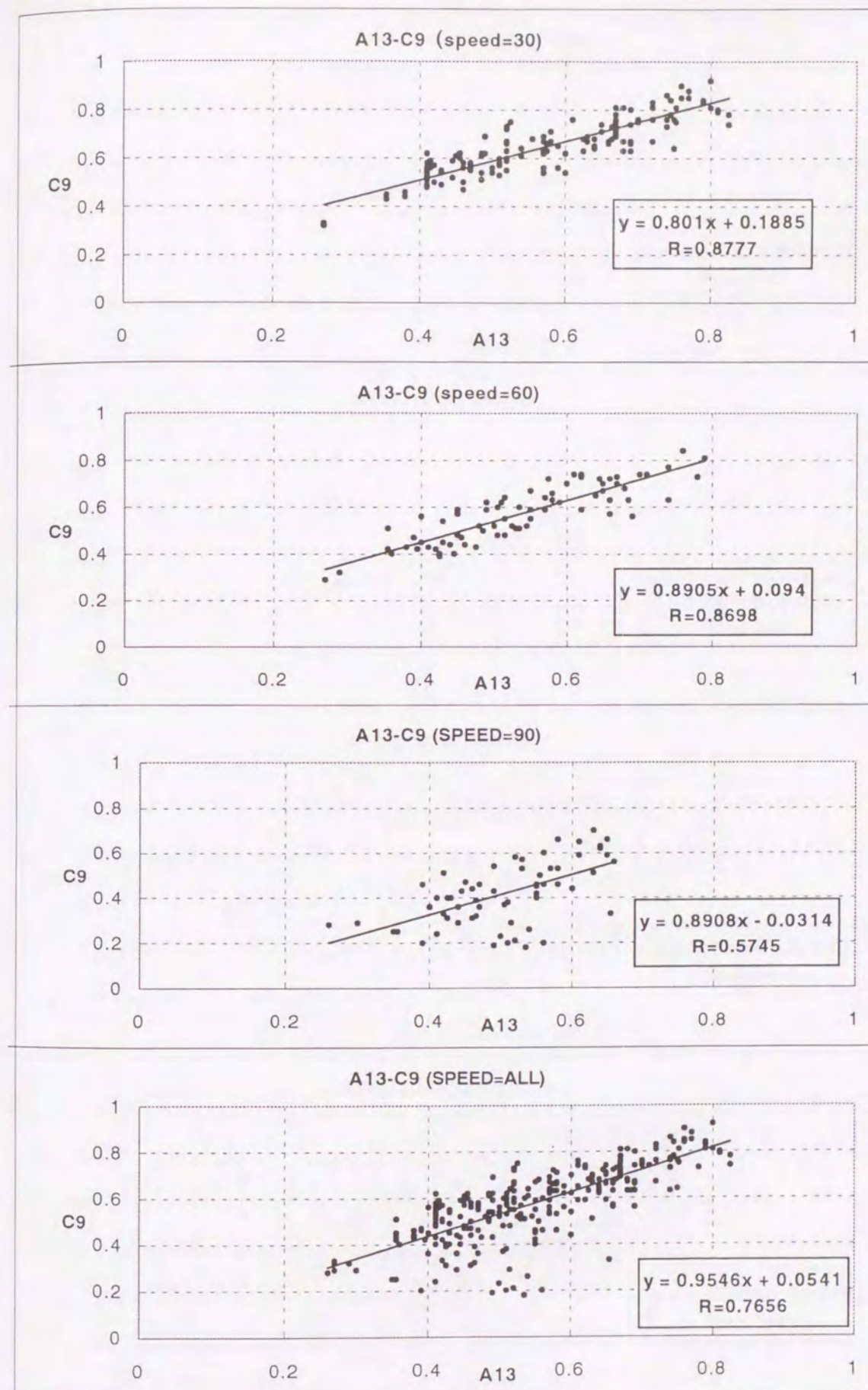


図-3. 15 DF テスター (A13) と C8 における測定速度別の相関図



図一3. 16 DF テスター (A13) と C9 における測定速度別の相関図

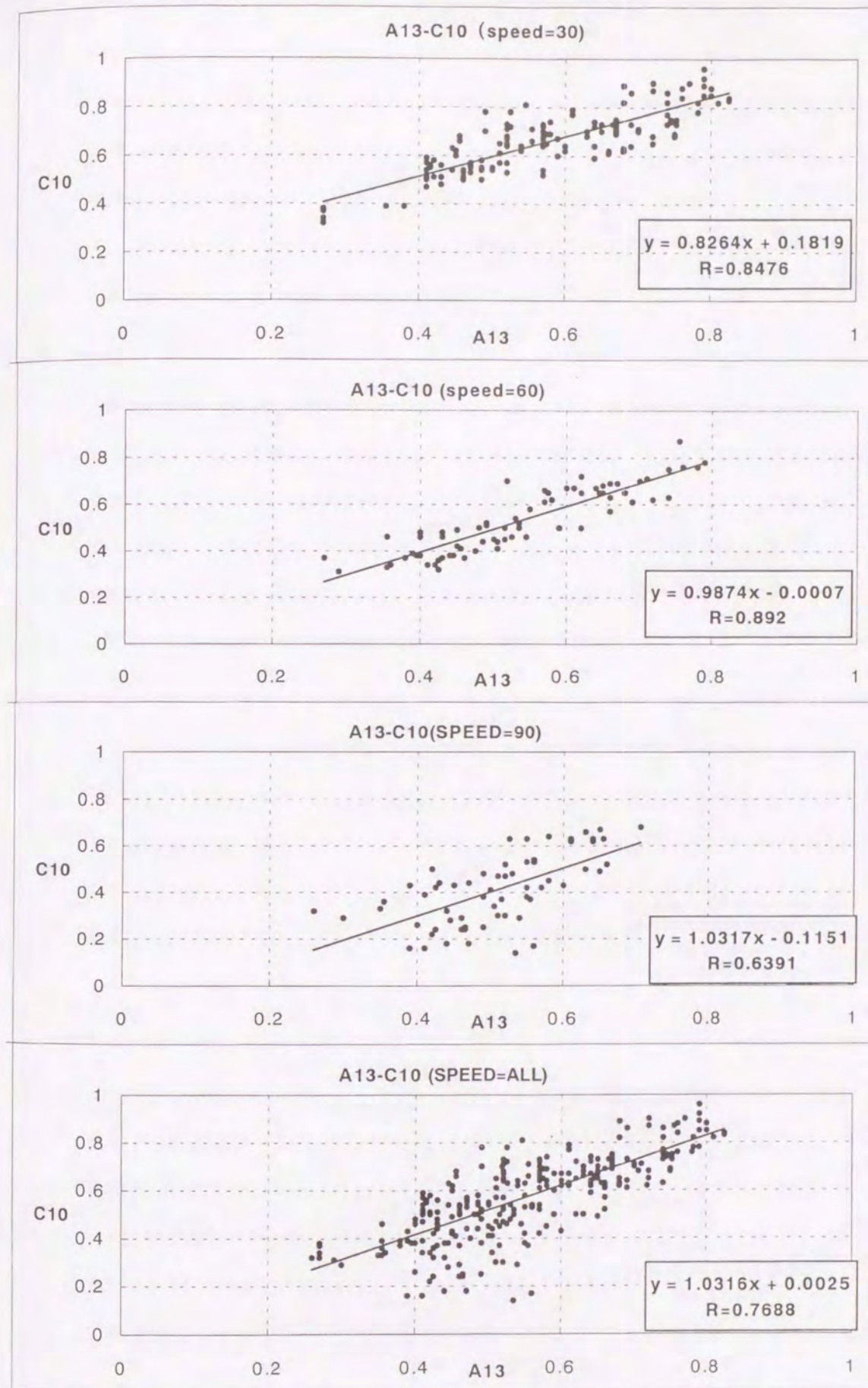


図-3. 17 DF テスター (A13) と C10 における測定速度別の相関図

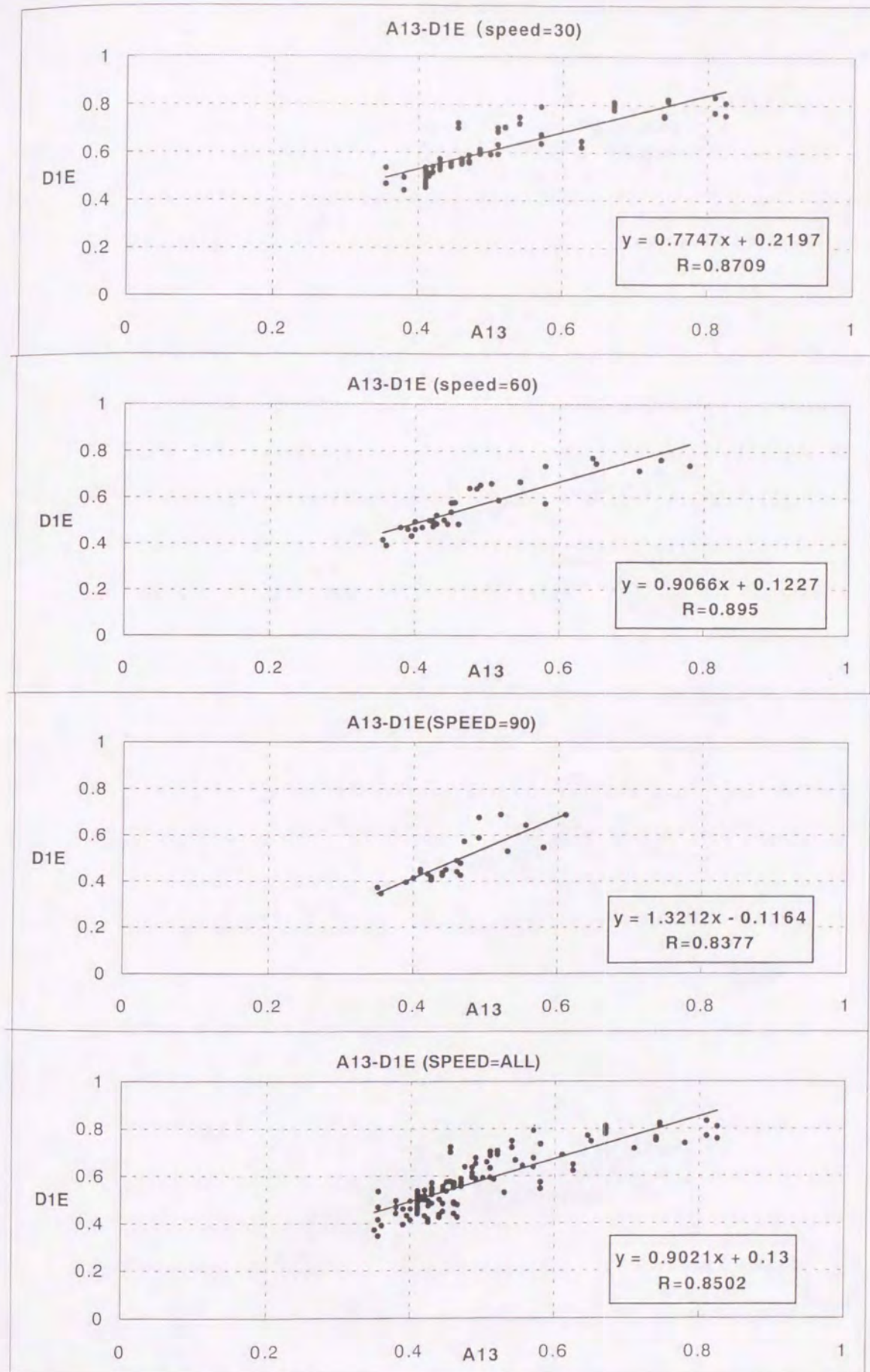
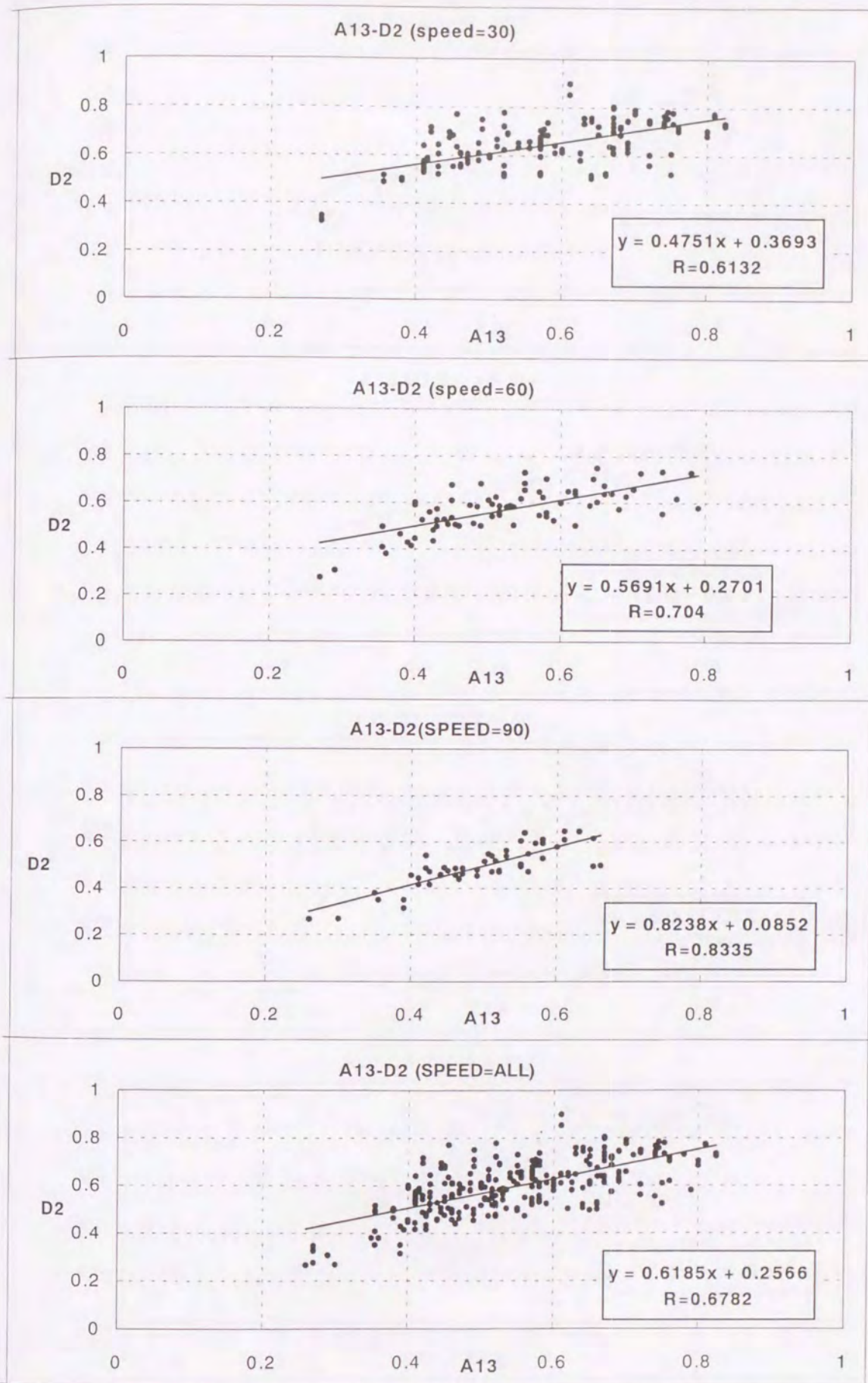
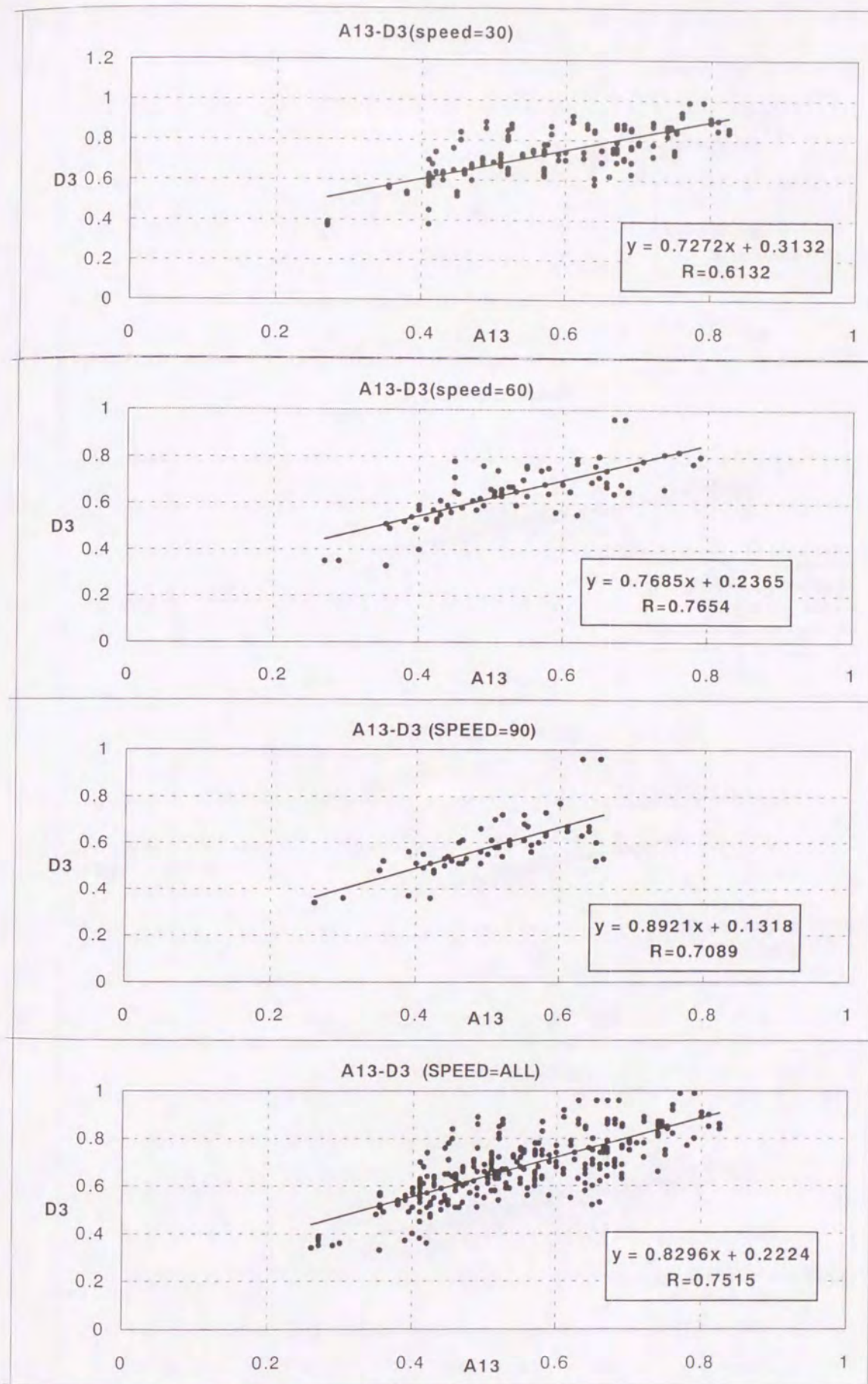


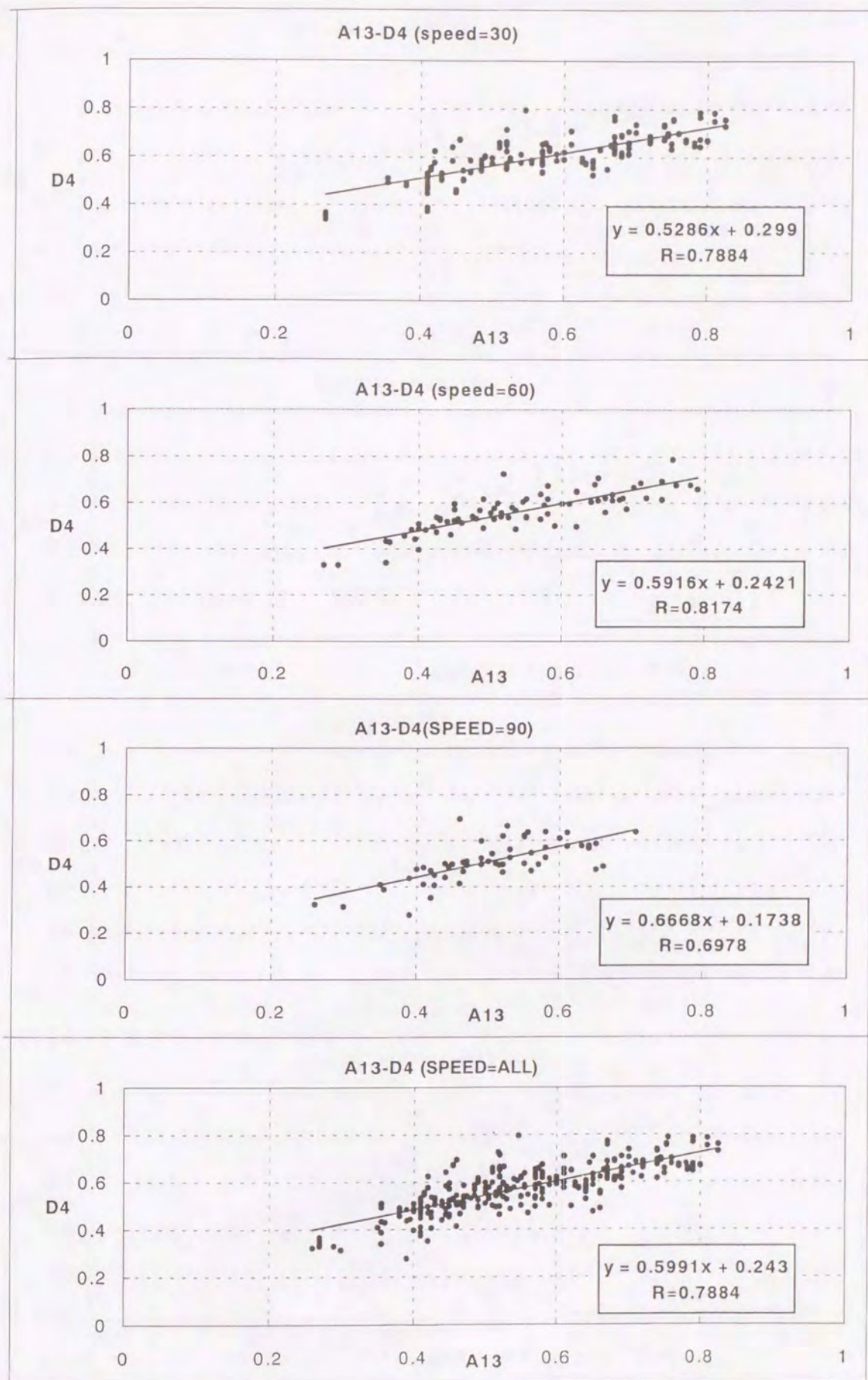
図-3. 18 DF テスター (A13) と D1E における測定速度別の相関図



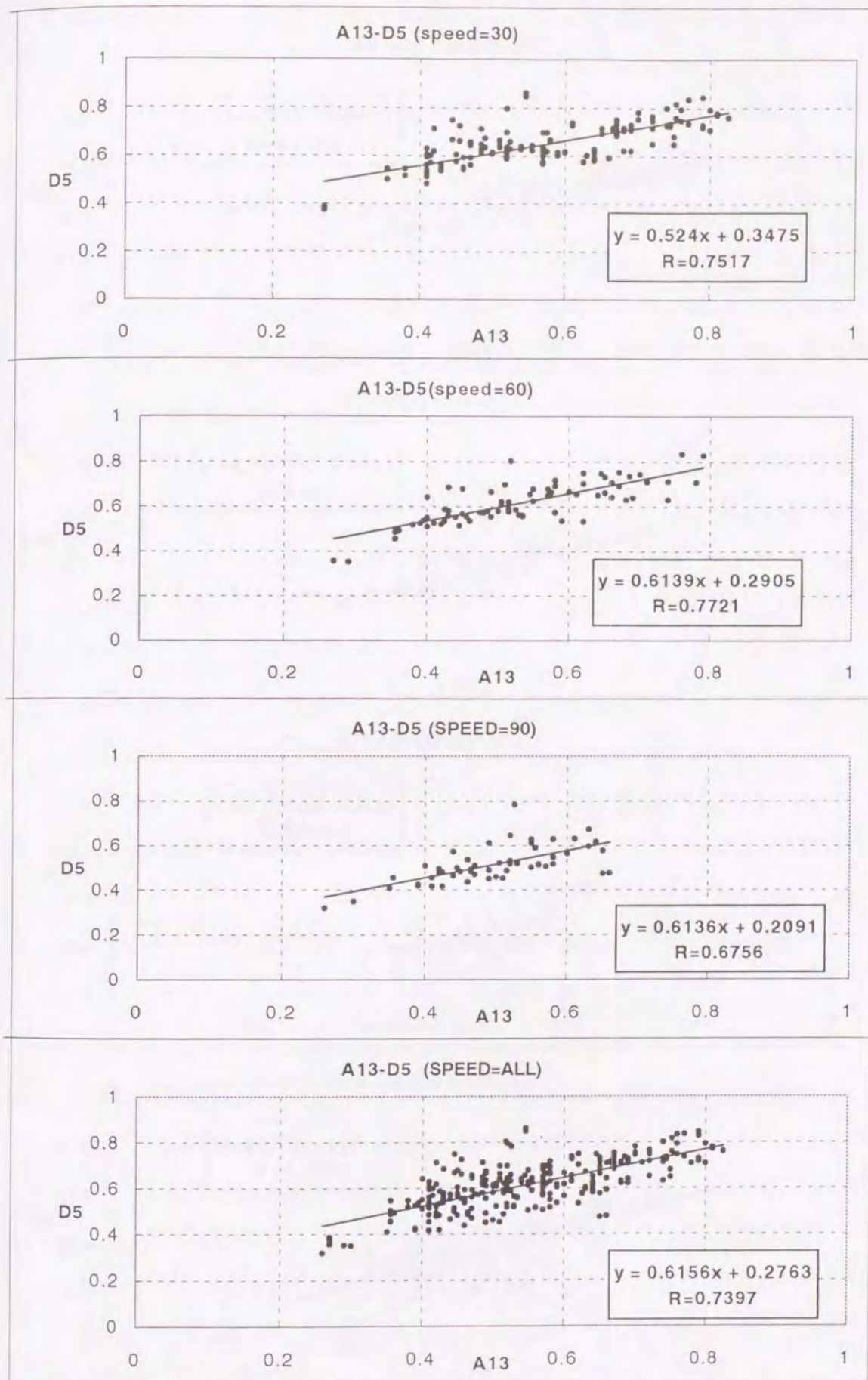
図一3. 19 DF テスター (A13) と D2 における測定速度別の相関図



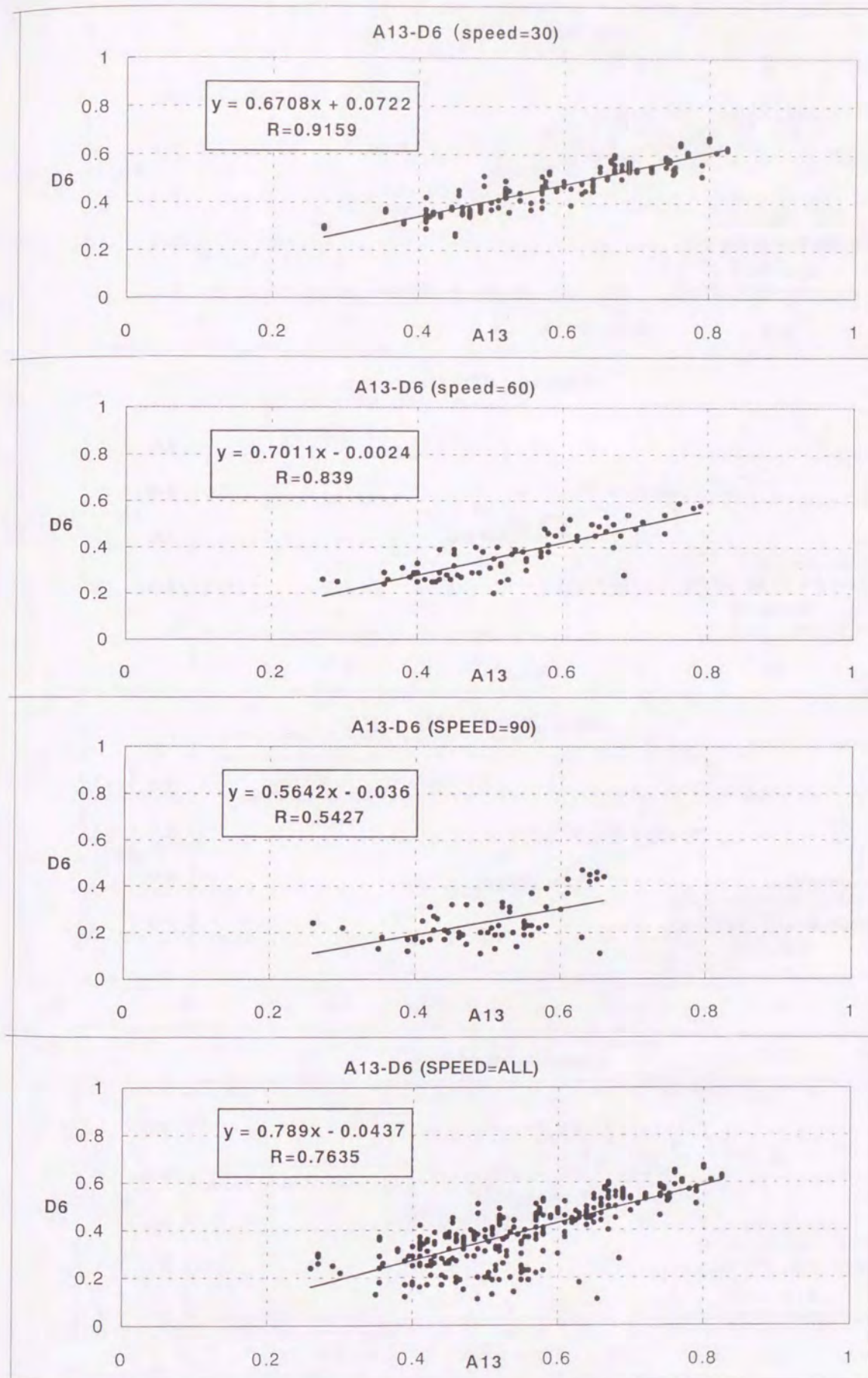
図一3. 20 DF テスター (A13) と D3 における測定速度別の相関図



図一3. 2 1 DF テスター (A13) と D4 における測定速度別の相関図



図一3. 2 2 DF テスター (A13) と D5 における測定速度別の相関図



図一3. 23 DF テスター (A13) と D 6 における測定速度別の相関図

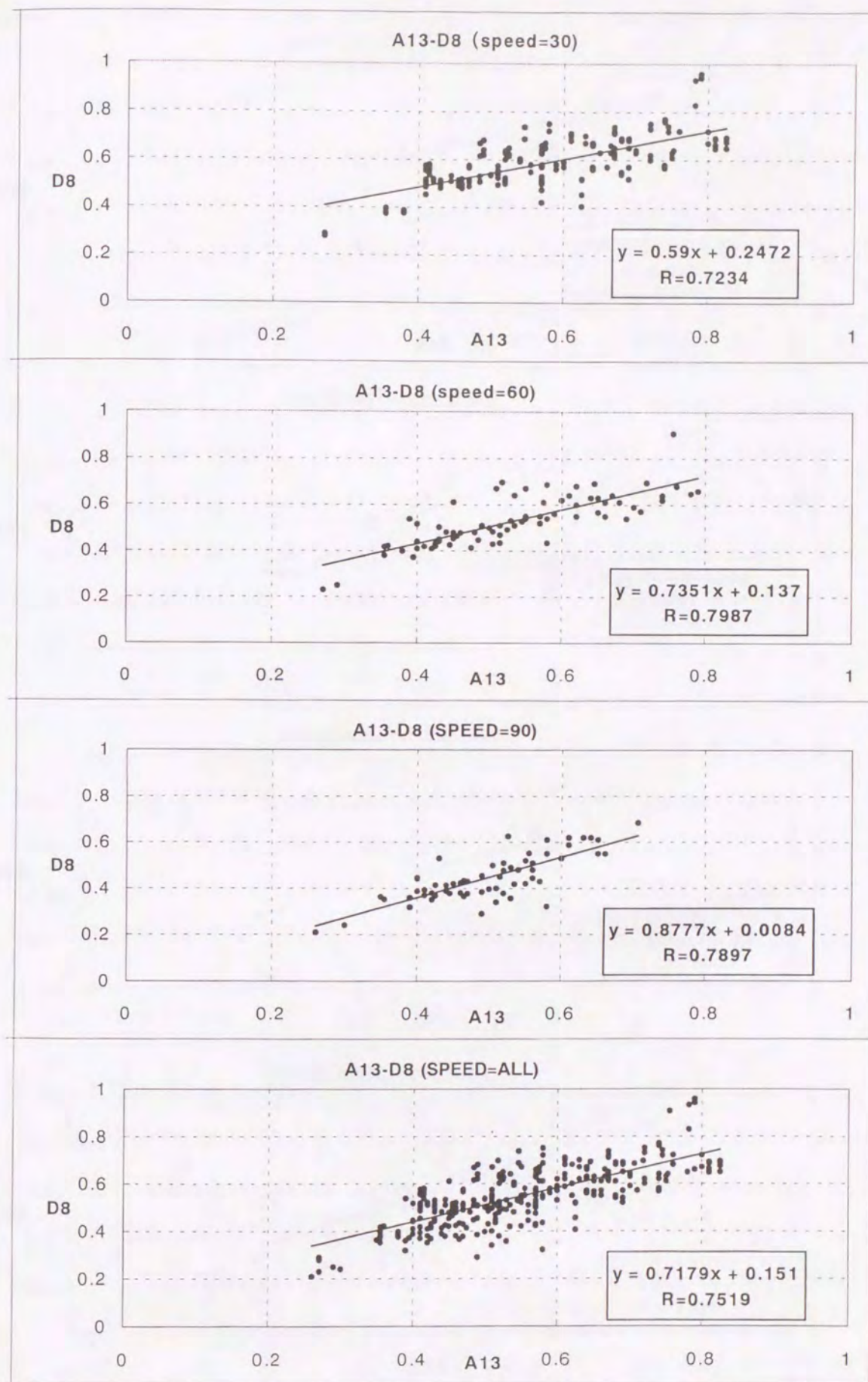
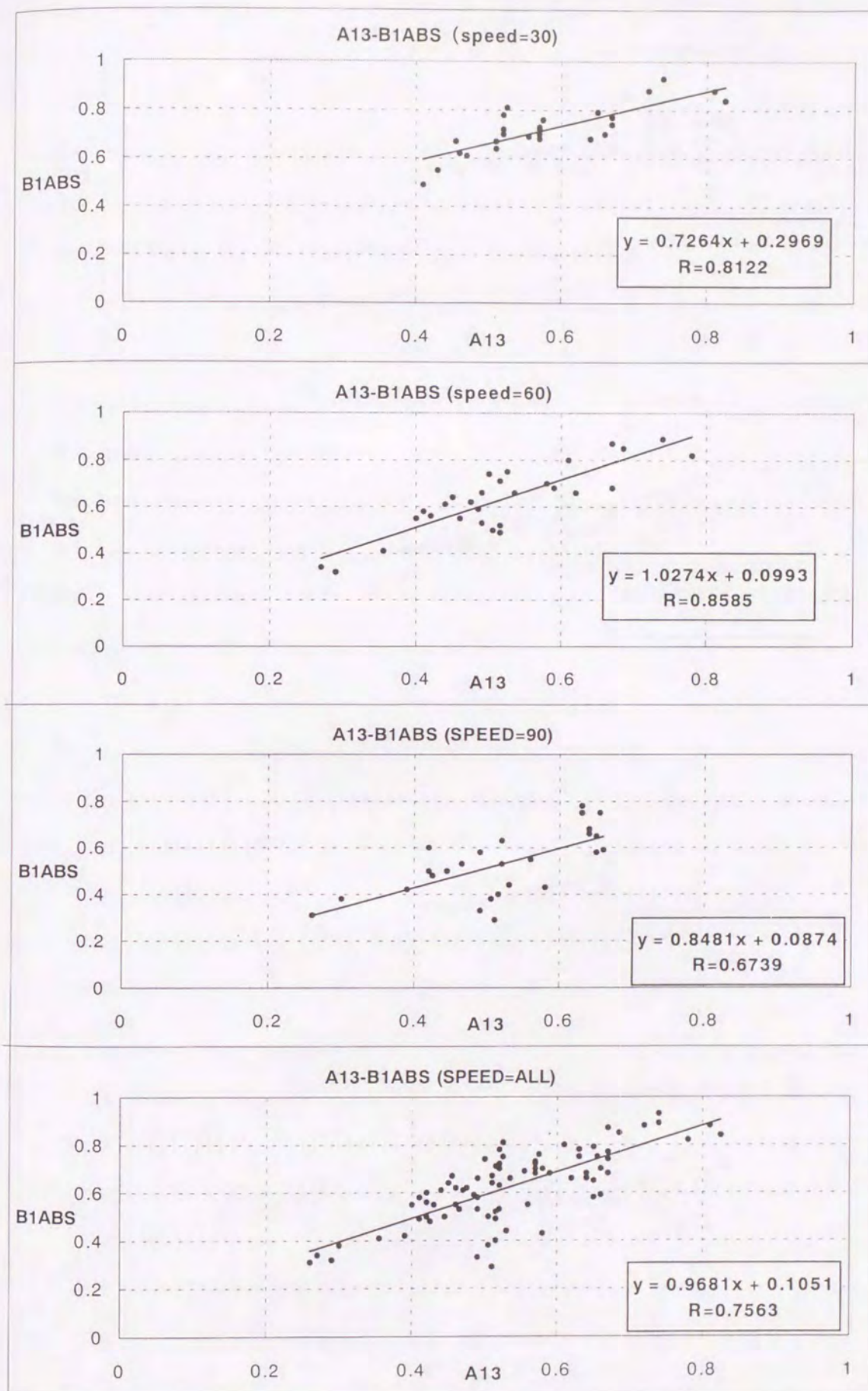


図-3. 2.4 DF テスター (A13) と D8 における測定速度別の相関図



図一3. 25 DF テスター (A13) と B1ABS における測定速度別の相関図

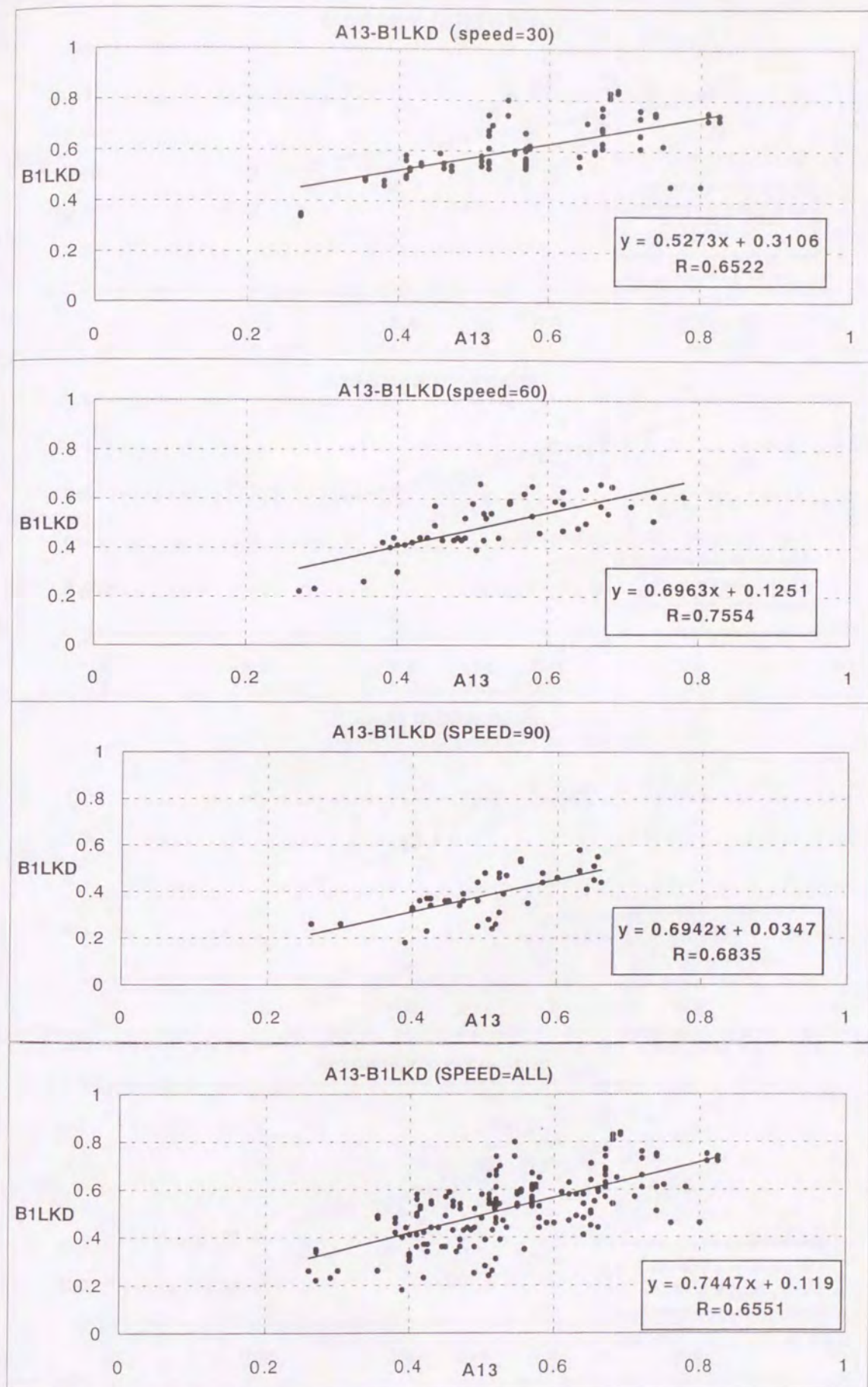
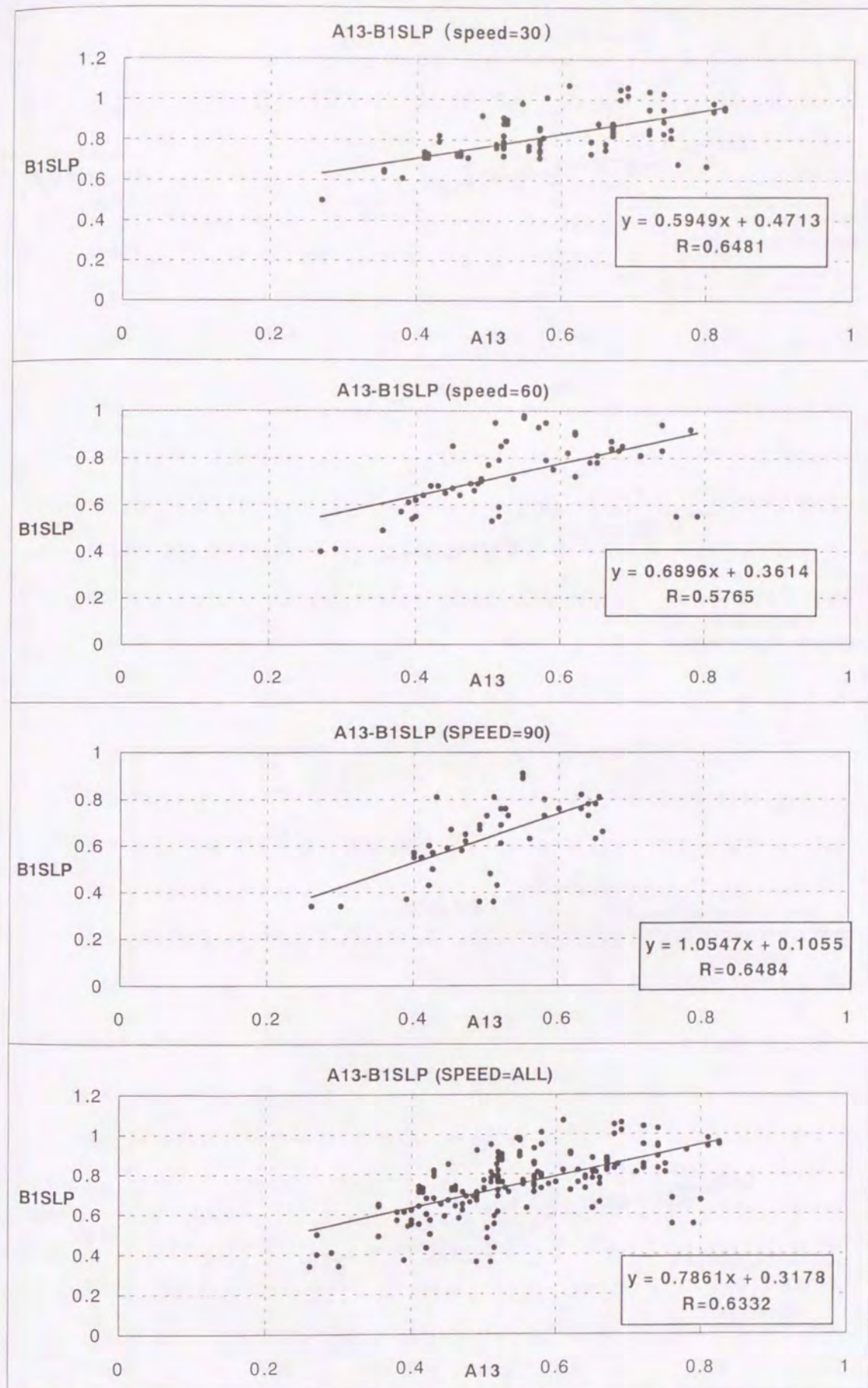
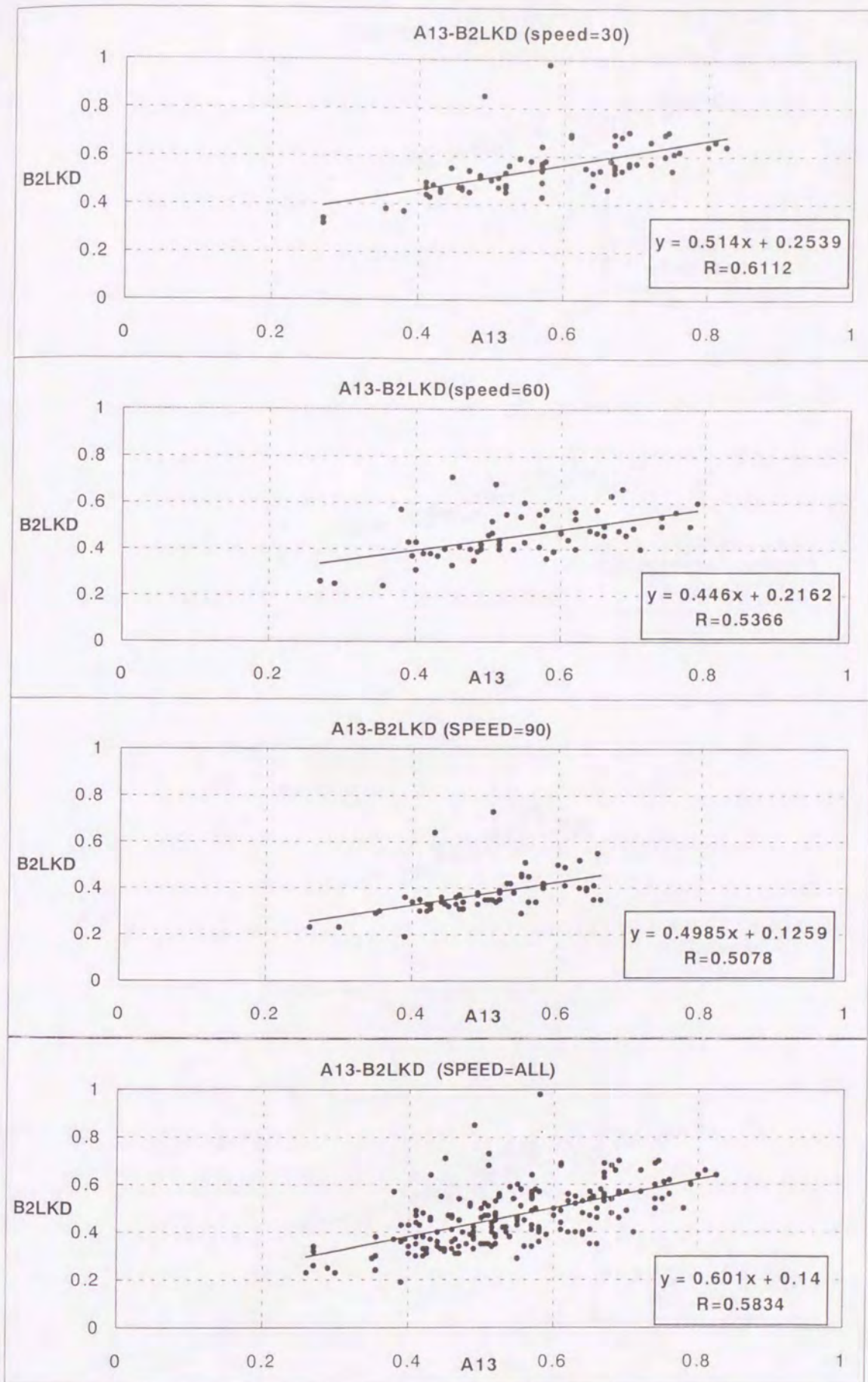


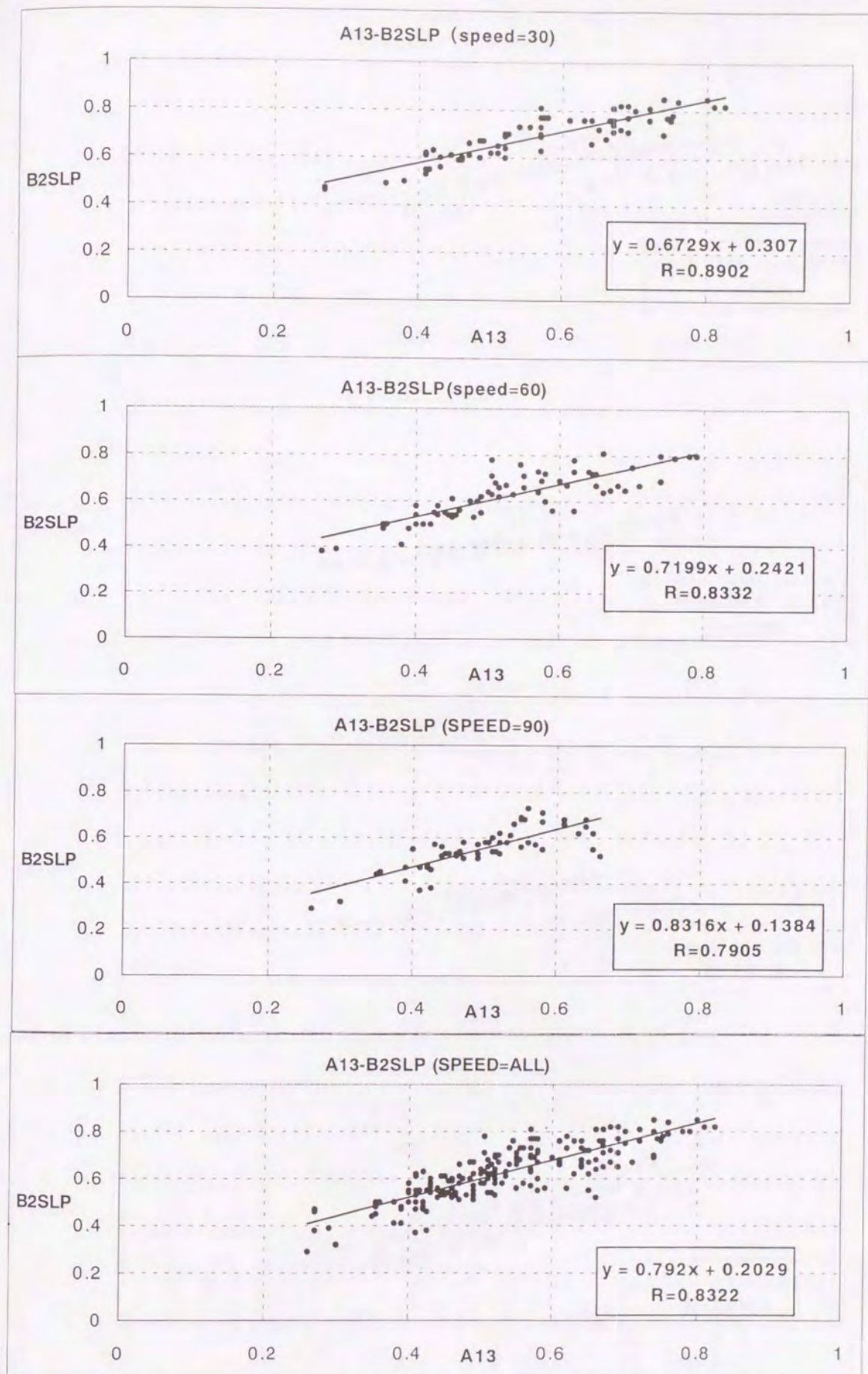
図-3. 26 DF テスター (A13) と B1LKD における測定速度別の相関図



図一3. 27 DF テスター (A13) と B1SLP における測定速度別の相関図



図—3. 28 DF テスター (A13) と B2LKD における測定速度別の相関図



図一3. 29 DF テスター (A13) と B2SLP における測定速度別の相関図

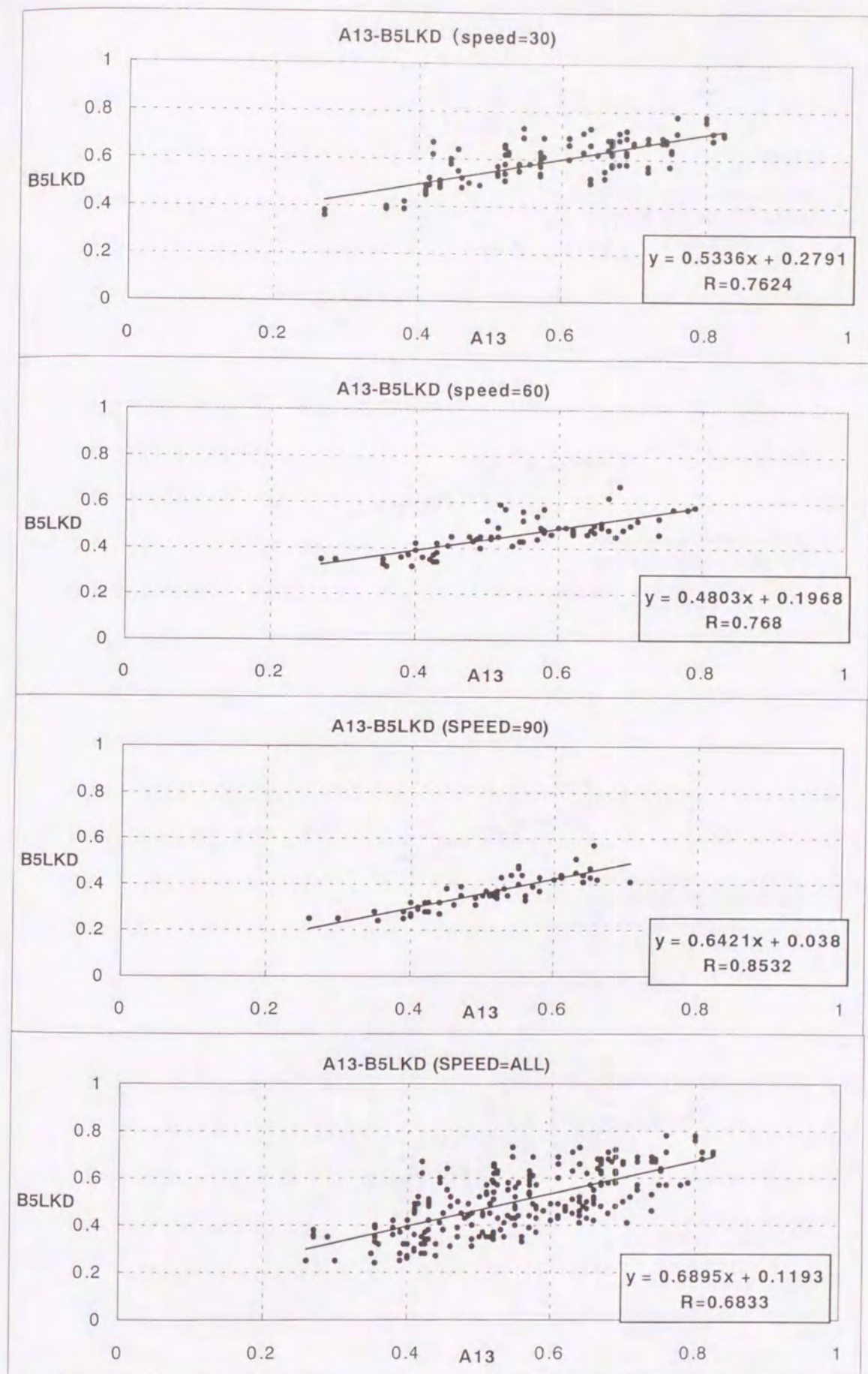


図-3. 30 DF テスター (A13) と B5LKD における測定速度別の相関図

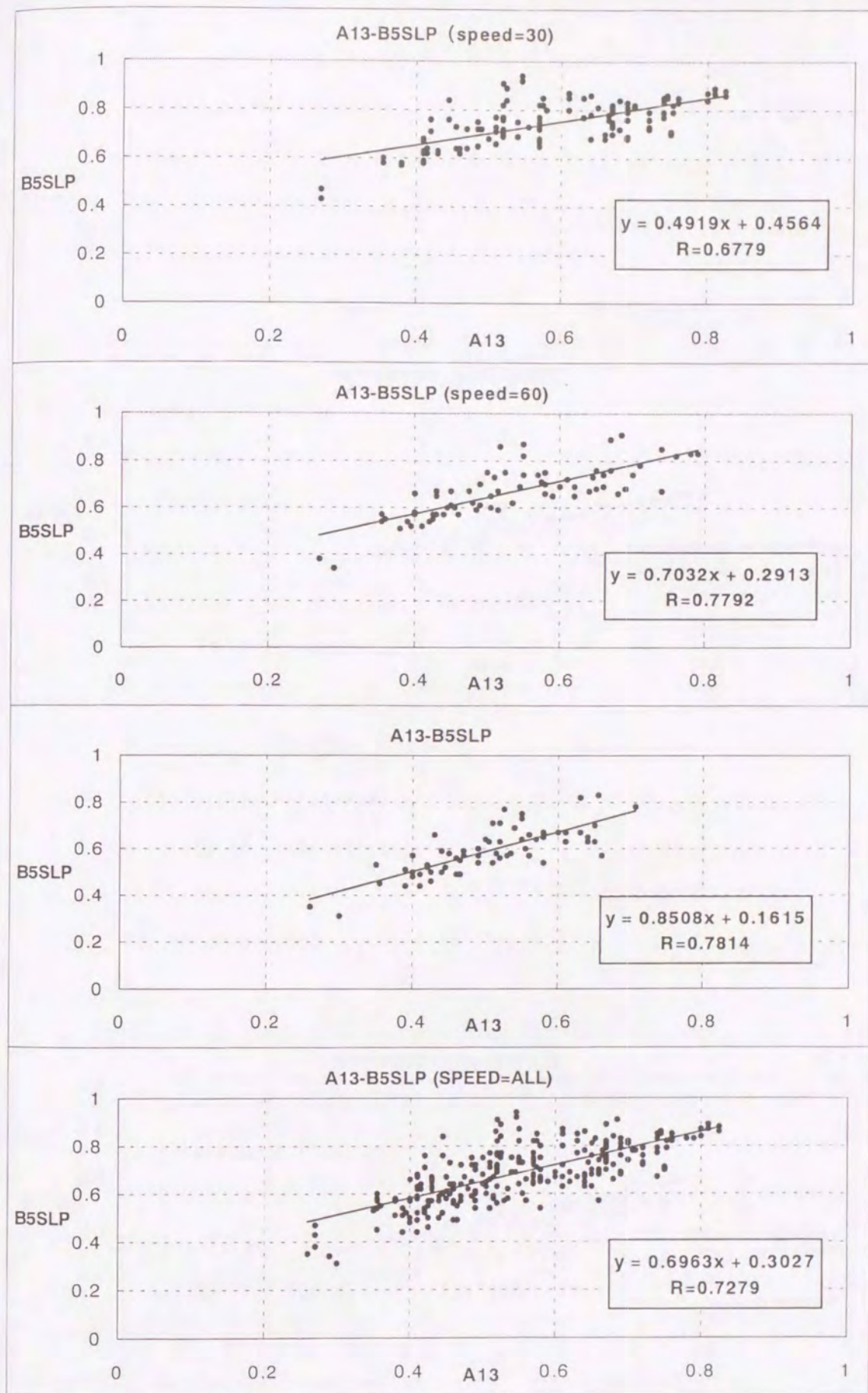
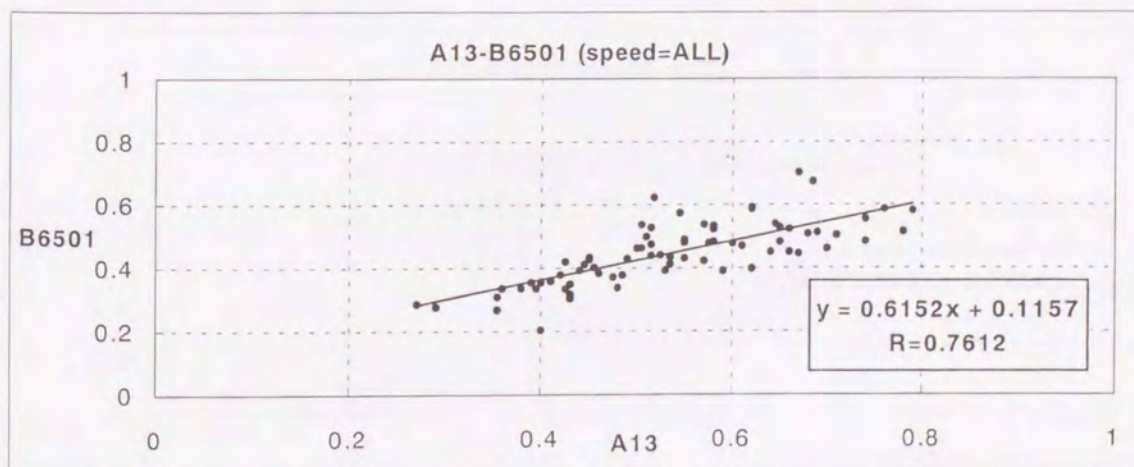
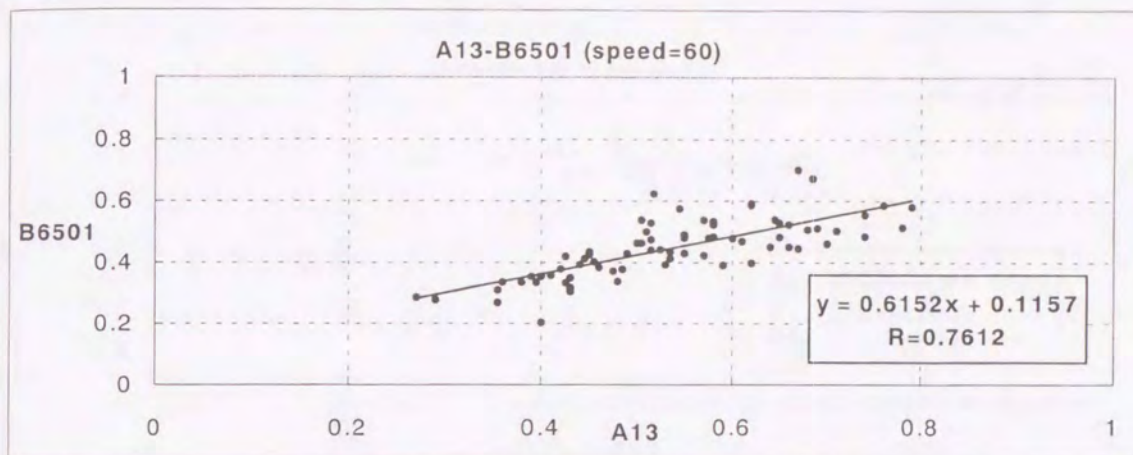


図-3. 3 1 DF テスター (A13) と B5SLP における測定速度別の相関図



図一3. 3 2 DF テスター (A13) と B6501 における測定速度別の相関図

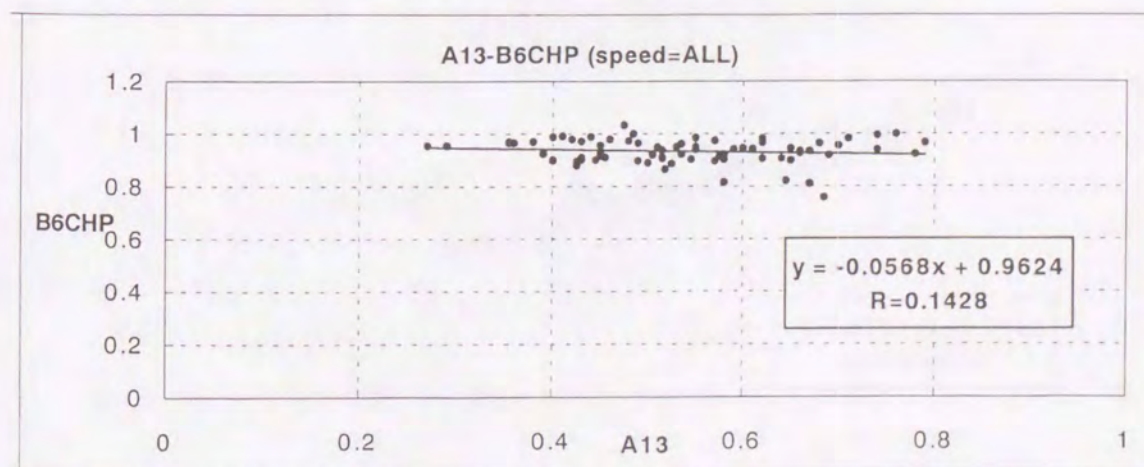
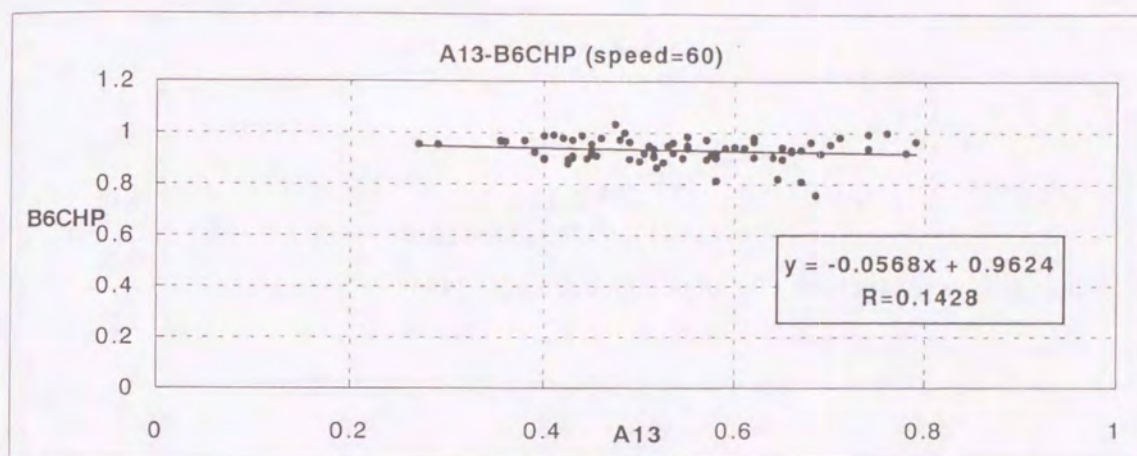
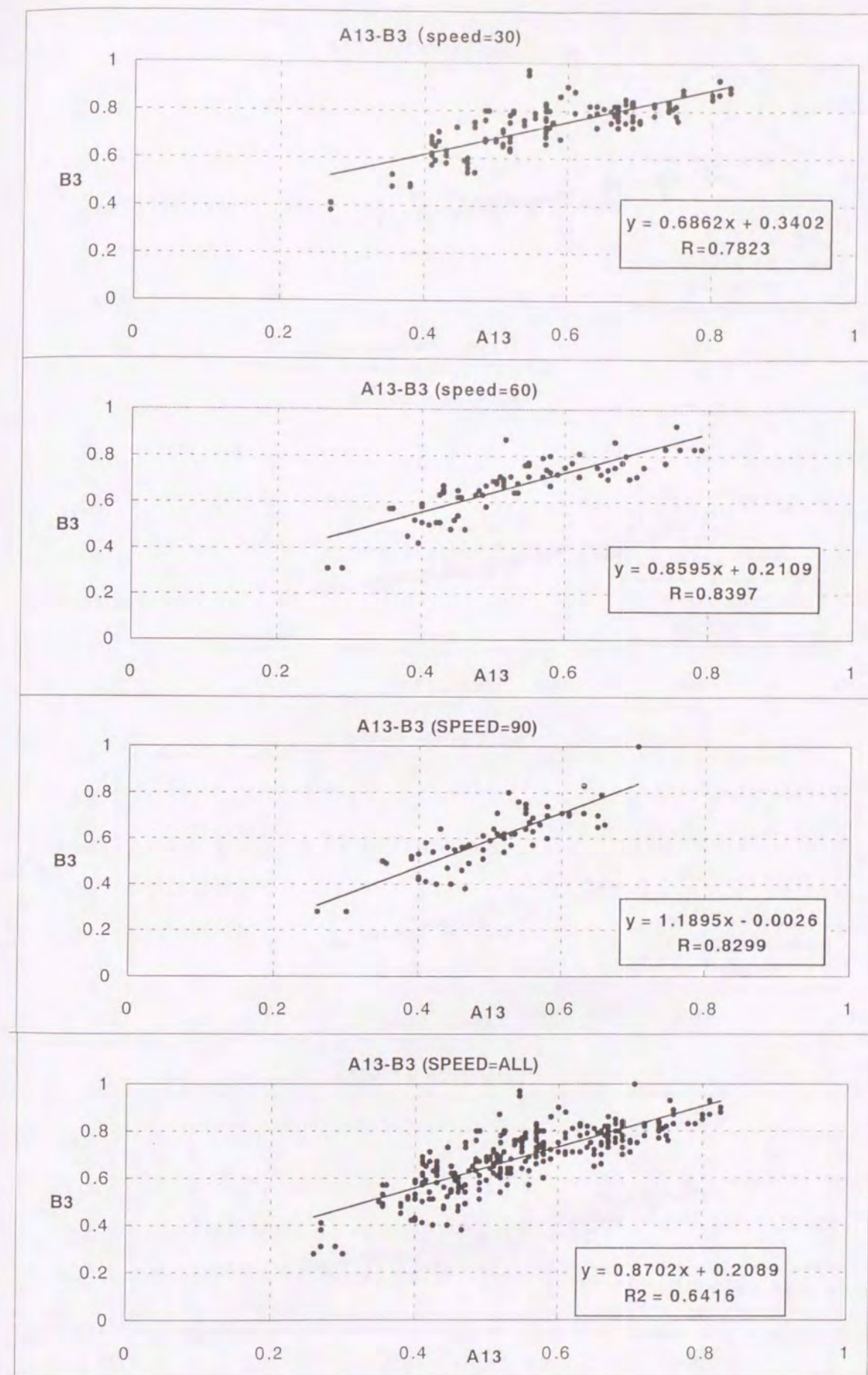
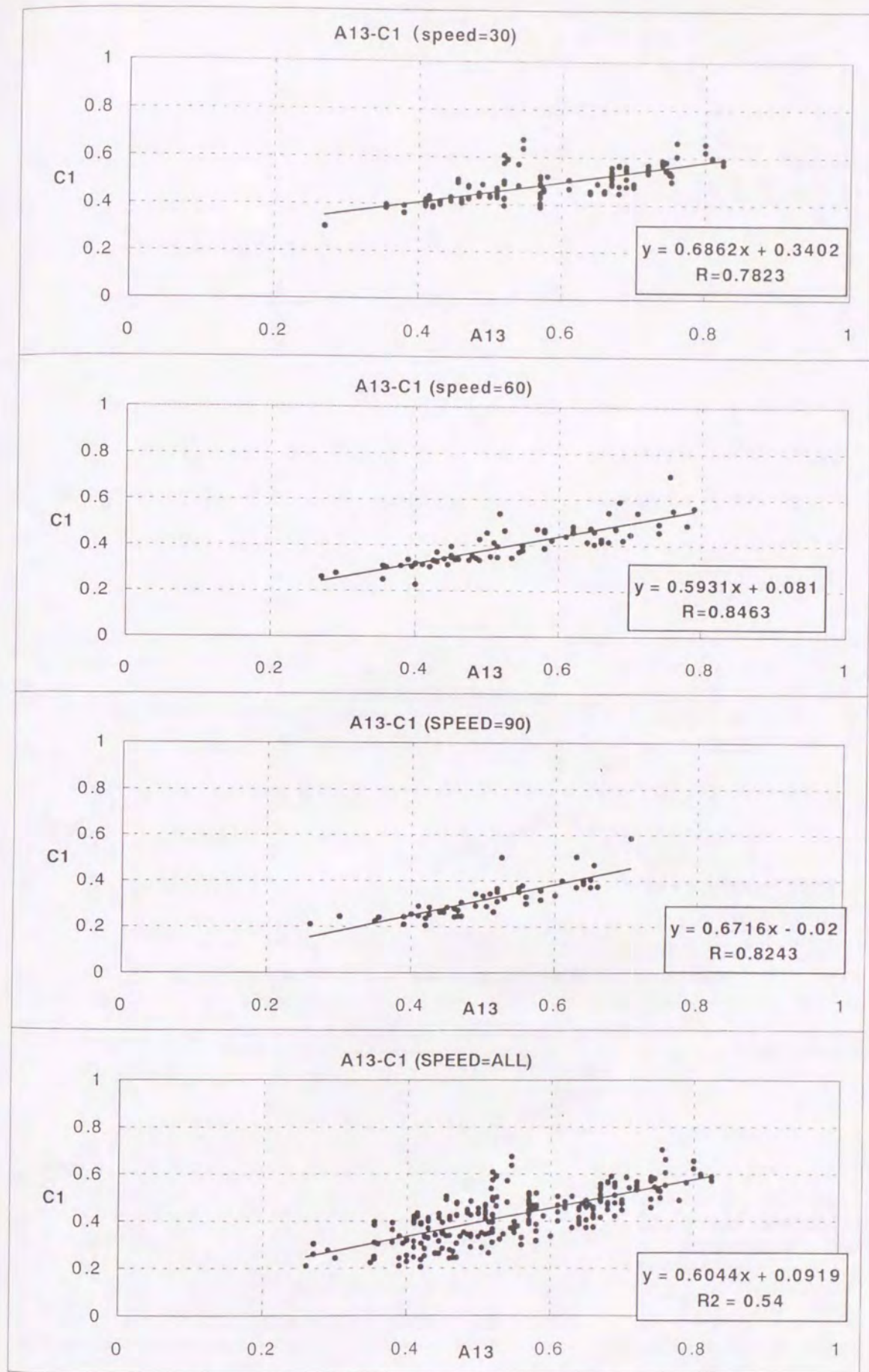


図-3. 3.3 DF テスター (A13) と B6CHP における測定速度別の相関図



図一3. 34 DF テスター (A13) と B3 における測定速度別の相関図



図一3. 35 DF テスター (A13) と C1 における測定速度別の相関図

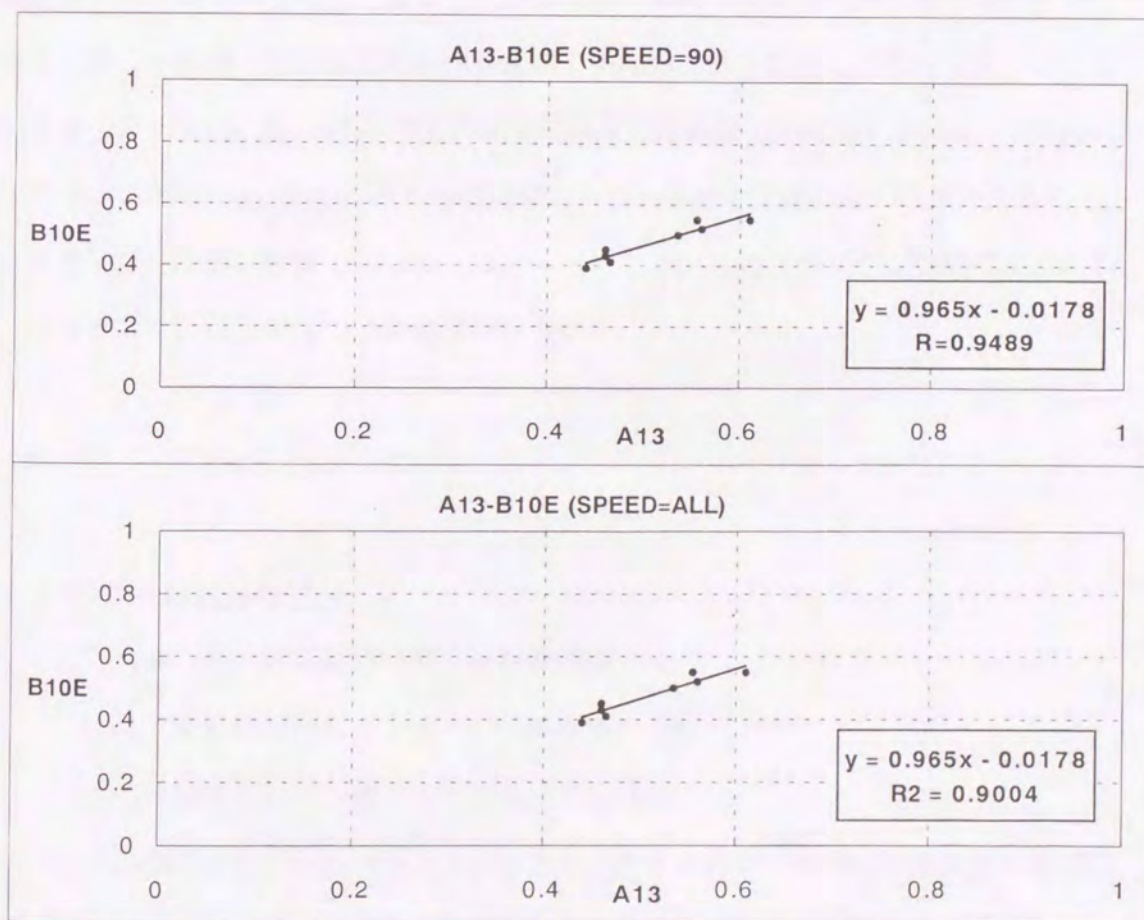


図-3. 36 DF テスター (A13) と D10E における測定速度別の相関図

3. 6 DFテスターと国際摩擦指標 (IFI) の関係

3. 6. 1 国際摩擦指標 (IFI)

摩擦の測定装置には、スリップ率固定方式、サイドフォース方式、及び車輪ロック方式という3つの基本的なタイプがあるが測定結果を基準化するのにマクロテクスチャーのパラメータが必要であると考えられる。国際摩擦指標はマクロテクスチャー測定と摩擦測定に関連する2つの数値から構成される必要がある。最終目的は、与えられた路面について、すべての装置がこの数値に対して同じ値を予測できるようにすることである。

すべての装置がこの数値を報告できる指標を開発するためにまず必要なことは、目標となる真の値を得ることである。だがしかし、実際には摩擦の真の値は得られないので、多くの装置が広い範囲のすべり速度で得た測定値を合成したものを表—3. 6に示す「ゴールデン値」とし、各実験路面の摩擦速度曲線 (Friction - Speed Curve) を作成するために使用した。これらの曲線は分析に使用する真の値の代用となるので、これを「ゴールデン曲線 (Golden Curve)」と呼ぶ。このゴールデン曲線は次式におけるGF60, GSの2つの数値で特性づけられる。

$$GF(S) = GF60 e^{(60-S)/GS} \quad (3. 3)$$

ここで Sはスリップ速度

GF(S)は路面の「真」の摩擦曲線

GF60はゴールデン値としての摩擦ナンバー

GSはゴールデン値としての速度ナンバー

ゴールデン値の速度ナンバー (GS) はマクロテクスチャーと関係すること、及び実験で得られたテクスチャー装置の測定値から非常に良く推定できることが明らかにされた。

表-3. 6 ゴールデン値(GOLDEN VALUE)

SITE	SECT	GF60	GS	SITE	SECT	GF60	GS
1	A	.549	375	34*	B	.672	134
1	B	.520	334	40	A	.398	169
2	A	.268	150	40	B	.402	165
2	B	.258	170	41	A	.445	132
3*	A	.280	72	41	B	.442	137
3*	B	.297	86	42	A	.356	75
4	A	.477	91	42	B	.393	96
4	B	.456	73	50	A	.327	64
6	A	.356	69	50	B	.355	62
6	B	.345	74	51	A	.239	68
8	A	.279	62	51	B	.259	89
8	B	.281	57	52	A	.298	85
9	A	.379	175	52	B	.277	86
9	B	.373	149	53	A	.308	72
10*	A	.478	134	53	B	.284	65
10*	B	.489	122	56	A	.297	85
11*	A	.375	77	56	B	.272	66
11	B	.441	103	57	A	.552	183
12	A	.586	240	57	B	.564	225
12	B	.582	256	58	A	.389	113
13	A	.518	297	58	B	.403	118
13*	B	.517	279	59	A	.256	76
15*	A	.450	295	59	B	.259	82
15*	B	.437	354	60	A	.261	74
17*	A	.223	63	60	B	.250	74
17*	B	.231	135	61	A	.262	62
18*	A	.450	223	61	B	.227	50
18	B	.485	166	62	A	.405	127
19	A	.491	198	62	B	.394	177
19	B	.497	237	63	A	.313	164
21	A	.518	181	63*	B	.277	153
21	B	.523	168	64	A	.523	245
24	A	.393	97	64	B	.517	170
24	B	.394	120	65	A	.263	67
26.1	A	.396	50	65	B	.250	68
26.1	B	.346	42	66	A	.261	76
26.2	A	.656	199	66	B	.245	64
26.2	B	.662	180	67	A	.434	68
32	A	.489	172	67	B	.456	98
32	B	.460	131	68	A	.320	99
33.1*	A	.294	53	68	B	.309	87
33.2	A	.323	53	69*	A	.292	66
33.3*	A	.367	60	69*	B	.328	72
33.4	A	.366	70	70*	A	.452	164
34*	A	.689	142	70*	B	.454	195

* The sites or sections marked with an asterisk were not used in the analysis of the International Experiment and were not used for most of the analyses in this report.

実際には、テクスチャーの値をゴールデン値速度ナンバーの推定値 (S_p) に変換する回帰式が必要になる。その推定式は次式で表される。

$$S_p = a + b \cdot TX \quad (3.4)$$

ここで、 TX はマクロテクスチャー装置測定で得られたテクスチャーパラメーターである。 a と b の値は、共同実験に参加したすべての装置により得られたテクスチャーパラメーターについて計算された。ISOにより標準化されようとしているMTDを測定した装置が最良の相関係数を示したので、以後の分析ではMPDをテクスチャーパラメーターとして使用した。摩擦の測定装置はその機構および測定方法により異なるスリップ速度で測定するので、速度 S を次のように測定する。

$$\text{車輪ロック方式の速度 (V)} \quad S = V$$

$$\text{スリップ率固定方式の速度} \quad S = V \cdot \text{装置のスリップ率} : \%$$

$$\text{サイドフォース方式 (スリップ角 } \alpha \text{)} \quad S = V \cdot \sin \alpha$$

摩擦の測定値を用いてGF60を推定する最初のステップは、測定された摩擦の測定値を基準速度60 km/hにおける摩擦の値に調整することである。この調整は、テクスチャー測定値から推定された速度ナンバーを用いて次式より行われる。

$$FR60 = FRS \cdot e^{(S-60)/S_p} \quad (3.5)$$

ここで $FR60$ は装置に対する摩擦の調整値

FRS は装置による摩擦の測定値

S は装置のスリップ速度

基準化の最終段階では、調整された測定値とゴールデン値の摩擦ナンバーとを次式により回帰させ、装置のキャリブレーションを行うことである。

$$F60 = A + B \cdot FR60 \quad (3.6)$$

(3) と (4) 式を組み合わせると F_{60} は摩擦の測定値 (F_{RS} , TX) で次式のように表される。

$$F_{60} = A + B \cdot F_{RS} e^{(S-60)/(a+b \cdot TX)} \quad (3.7)$$

ここで A と B は共同実験に参加した個々の装置に対するキャリブレーション係数である。 F_{60} はゴールデン値のフリクションナンバー (G_{F60}) の推定値であり、 S_p はゴールデン値の速度ナンバー (G_S) の推定値である。

この F_{60} と S_p はゴールデン国際摩擦指標 (G_{IFI}) の推定値である国際摩擦指標 (IFI) となる。

3.6.2 PIARCモデルによるIFIの関係

国際共同実験の最大の成果は、路面のテクスチャーを組み込んだモデルを利用して、任意の測定装置で任意の速度で測定したすべり抵抗値を共通の尺度に変換するPIARCモデルを開発し、モデルの2つのパラメーター、 F_{60} と S_p 、を用いた国際摩擦指標 IFI (F_{60} , S_p) を提案したことである。

PIARC Model は Penn State Model を変形して次のように表現される。

$$F(S) = F_{60} \cdot e^{(60-S)/S_p} \quad (3.8)$$

ここで、 $F(S)$ はスリップ速度 S における基準化したすべり抵抗値、 S はスリップ速度である。

3.6.3 IFIを推定する手順

IFI を推定する手順を図-3.37に示すが、最初にすべり抵抗の速度依存性を表す速度定数 (speed constant) S_p をマクロテクスチャー測定値から推定すること

が必要になる。国際共同実験ではこのパラメータはテクスチャー測定値TXから次式で測定するものとした。

$$S_p = a + b \cdot TX \quad (3.9)$$

ここで、aとbはテクスチャー測定装置に固有の定数で国際共同実験から定められるものである。

次に、任意のスリップ速度Sにおけるすべり抵抗測定値FRSを、次式から60km/hの速度におけるすべり抵抗値(FR60)に変換する。

$$FR60 = FRS \cdot e^{(S-60)/S_p} \quad (3.10)$$

さらに、このFR60を次式によりIFIの基準化されたすべり抵抗値(F60)に変換する。

$$F60 = A + B \cdot FR60 \quad (3.11)$$

ここで、AとBは国際共同データから定められるすべり抵抗測定装置に固有の定数である。結局、式(3.10)を式(3.11)に代入すると、次式が得られる。

$$F60 = A + B \cdot FRS \cdot e^{(S-60)/S_p} \quad (3.12)$$

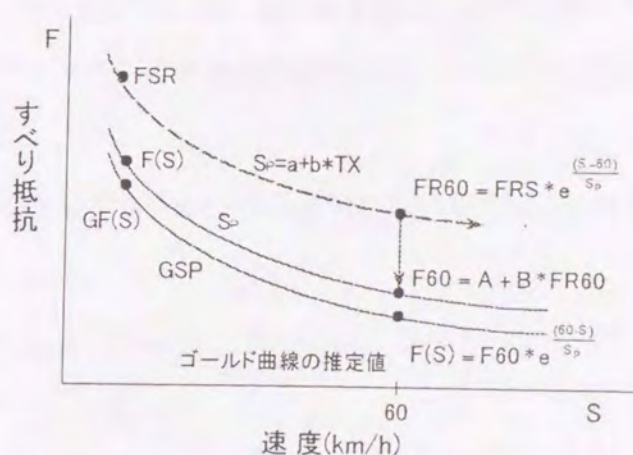


図-3.37 PIARCモデルによるIFIの推定手順

3. 6. 4 DF テスターと IFI の関係

3. 6. 1 から、共同実験に参加した DF テスターのデータから算出された DF テスターの A・B の値がわかり、S_p の値が出れば次式

$$F60 = A + B \cdot FRS e^{(S-60)/(a+b \times TX)} \quad (3. 13)$$

により IFI の値を推定できる。

ここで、速度ナンバー S_p を推定するテクスチャーとしては A2MPD と A8MTD の2つの装置を今回の研究では用いた。A2MPD はスウェーデンの大型の車両走行タイプのプロフィロメータであり、A8MTD は非常に簡便なサンドパッチ法である。

MPD を使用するためにはテクスチャープロフィルを測定する必要があるが、もしプロフィロメータが得られない場合には容積法によるテクスチャー深さ MTD を使用することができる。MTD を用いる利点は高価な装置が必要でないことであるが、欠点は車両により測定する方法でないので、一般の道路で測定を行う時に道路を閉鎖する必要があることである。

3. 6. 5 DF テスターのデータと MPD を用いた IFI の決定

DF テスターの測定速度 20、30、40、60 km/h での国際実験に参加したデータと A2MPD をもとにして IFI 算出を試みしてみる。なお、この分析に用いるデータを表-3. 7 に示す。

速度ナンバーを推定する A2MPD を使用した結果は次のとおりである。

$$Sp = 14.0 + 90.0 \times A2MPD \quad R = 0.94 \quad N = 67 \quad (3. 14)$$

F60 から GF60 を推定するために FR60 と GF60 の回帰の結果、測定速度別に次の式を得た。また得られた相関図を速度別に図-3. 38～図-3. 41 に示す。

測定速度 20km/h $F60=0.717 \times FR60+0.083$ $R=0.95$ $N=76$

測定速度 30km/h $F60=0.7361 \times FR60+0.0554$ $R=0.95$ $N=76$

測定速度 40km/h $F60=0.7669 \times FR60+0.238$ $R=0.94$ $N=76$

測定速度 60km/h $F60=0.7602 \times FR60-0.0301$ $R=0.88$ $N=76$

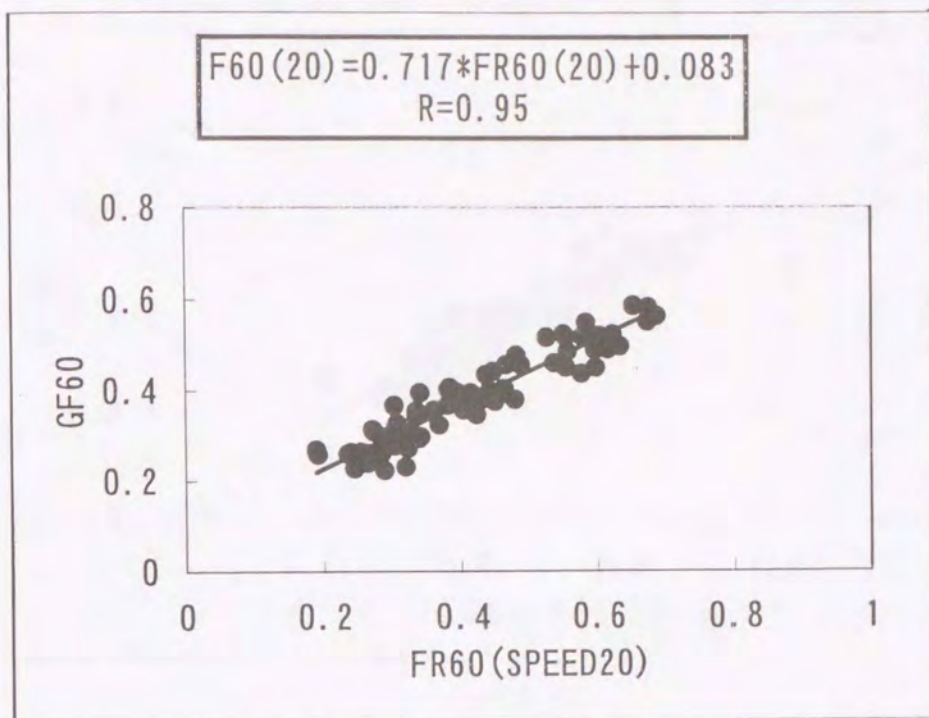
I F I 算出の結果、ゴールデン値との相関は、測定速度が 20、30、40km/h の時は相関係数がほぼ 0.95 と非常に高く、60km/h 時においても 0.88 と良好な関係が得られ、国際摩擦指標の算出が可能であることが示された。

表一 3. 7 DF テスターと MPD から IFI を決定するのに使用したデータ

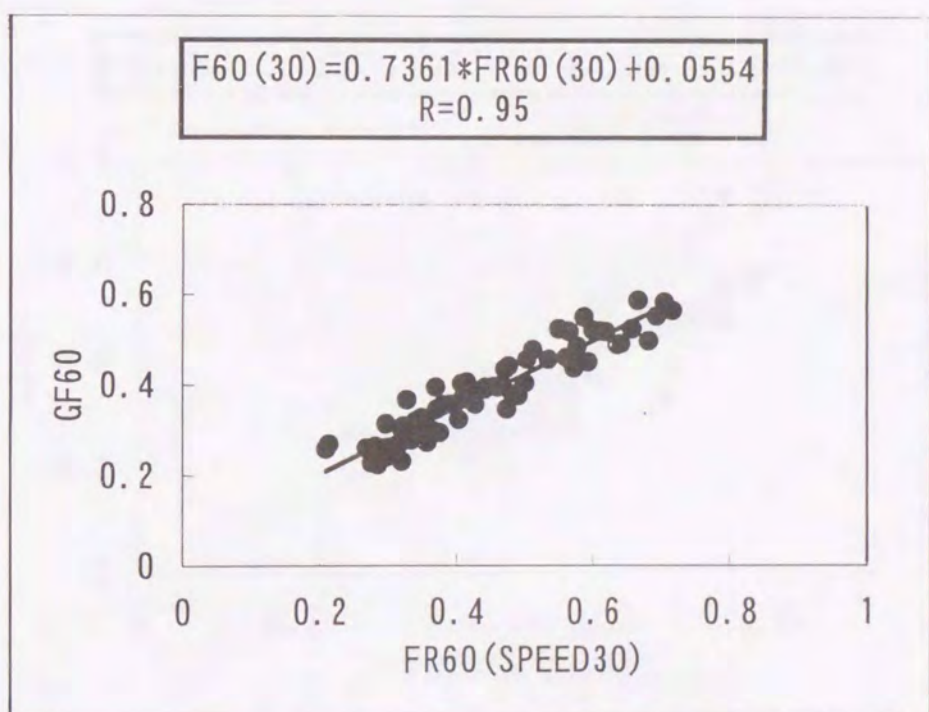
SITE	SEC	GF60	GS	MPD	Sp	S	FRS	S	FRS	S	FRS	S	FRS	FR60	FR60	FR60	FR60	F60	F60	F60	F60
				A2	MPD	20	20	30	30	40	40	60	60	20	30	40	60	20	30	40	60
1	A	0.55	375	3.1	294	20	0.67	30	0.65	40	0.62	60	0.61	0.58	0.59	0.58	0.61	0.50	0.49	0.47	0.43
1	B	0.52	334	2.9	271	20	0.70	30	0.67	40	0.66	60	0.67	0.60	0.60	0.61	0.67	0.52	0.50	0.49	0.48
2	A	0.27	150	1.3	127	20	0.26	30	0.27	40	0.26	60	0.27	0.19	0.21	0.22	0.27	0.22	0.21	0.19	0.18
2	B	0.26	170	1.2	118	20	0.27	30	0.27	40	0.27	60	0.29	0.19	0.21	0.23	0.29	0.22	0.21	0.20	0.19
4	A	0.48	91	0.8	88	20	0.76	30	0.72	40	0.68	60	0.62	0.48	0.51	0.54	0.62	0.43	0.43	0.44	0.44
4	B	0.46	73	0.7	78	20	0.78	30	0.74	40	0.69	60	0.62	0.47	0.50	0.53	0.62	0.42	0.43	0.43	0.44
6	A	0.36	69	0.7	78	20	0.61	30	0.58	40	0.55	60	0.51	0.36	0.39	0.42	0.51	0.34	0.34	0.35	0.35
6	B	0.35	74	0.6	70	20	0.60	30	0.57	40	0.55	60	0.52	0.34	0.37	0.41	0.52	0.32	0.33	0.34	0.36
8	A	0.28	62	0.5	55	20	0.60	30	0.57	40	0.55	60	0.52	0.29	0.33	0.38	0.52	0.29	0.30	0.32	0.36
8	B	0.28	57	0.5	58	20	0.59	30	0.56	40	0.53	60	0.51	0.29	0.33	0.38	0.51	0.29	0.30	0.31	0.35
9	A	0.38	175	1.8	179	20	0.60	30	0.57	40	0.53	60	0.48	0.48	0.48	0.47	0.48	0.43	0.41	0.39	0.33
9	B	0.37	149	1.5	146	20	0.56	30	0.52	40	0.48	60	0.43	0.43	0.42	0.42	0.43	0.39	0.37	0.34	0.30
11	A	0.38	77	0.8	88	20	0.71	30	0.69	40	0.64	60	0.58	0.45	0.49	0.51	0.58	0.41	0.42	0.41	0.41
11	B	0.44	103	0.8	84	20	0.72	30	0.68	40	0.63	60	0.57	0.45	0.48	0.50	0.57	0.40	0.41	0.40	0.40
12	A	0.59	240	2.4	228	20	0.78	30	0.76	40	0.77	60	0.76	0.65	0.67	0.71	0.76	0.55	0.55	0.56	0.55
12	B	0.58	256	2.5	237	20	0.80	30	0.80	40	0.80	60	0.79	0.68	0.70	0.74	0.79	0.57	0.57	0.59	0.57
13	A	0.52	297	2.9	275	20	0.67	30	0.68	40	0.66	60	0.66	0.58	0.61	0.61	0.66	0.50	0.50	0.49	0.47
13	B	0.52	279	2.9	277	20	0.69	30	0.69	40	0.67	60	0.69	0.60	0.62	0.62	0.69	0.51	0.51	0.50	0.49
15	A	0.45	295	3	281	20	0.69	30	0.66	40	0.61	60	0.59	0.60	0.59	0.57	0.59	0.51	0.49	0.46	0.42
15	B	0.44	354	2.8	270	20	0.67	30	0.64	40	0.62	60	0.62	0.58	0.57	0.58	0.62	0.50	0.48	0.47	0.44
17	A	0.22	63	0.8	82	20	0.47	30	0.41	40	0.38	60	0.36	0.29	0.28	0.30	0.36	0.29	0.27	0.25	0.24
17	B	0.23	135	0.8	88	20	0.51	30	0.45	40	0.43	60	0.40	0.32	0.32	0.34	0.40	0.31	0.29	0.29	0.27
18	A	0.45	223	1.9	183	20	0.69	30	0.67	40	0.65	60	0.65	0.55	0.57	0.58	0.65	0.48	0.47	0.47	0.46
18	B	0.49	166	2.1	201	20	0.68	30	0.67	40	0.65	60	0.64	0.56	0.58	0.59	0.64	0.48	0.48	0.48	0.46
19	A	0.49	198	2.7	258	20	0.72	30	0.72	40	0.72	60	0.68	0.62	0.64	0.67	0.68	0.53	0.53	0.53	0.49
19	B	0.50	237	3.4	316	20	0.72	30	0.75	40	0.72	60	0.74	0.63	0.68	0.68	0.74	0.54	0.56	0.54	0.53
21	A	0.52	181	1.5	149	20	0.73	30	0.69	40	0.64	60	0.60	0.55	0.56	0.56	0.60	0.48	0.47	0.45	0.43
21	B	0.52	168	1.6	158	20	0.71	30	0.67	40	0.62	60	0.58	0.55	0.55	0.55	0.58	0.48	0.46	0.44	0.41
24	A	0.39	97	1.1	113	20	0.63	30	0.60	40	0.57	60	0.54	0.44	0.46	0.48	0.54	0.40	0.39	0.39	0.38
24	B	0.39	120	1	104	20	0.61	30	0.59	40	0.56	60	0.53	0.42	0.44	0.46	0.53	0.38	0.38	0.37	0.37
26	A	0.40	50	0.5	55	20	0.82	30	0.79	40	0.75	60	0.69	0.39	0.46	0.52	0.69	0.37	0.39	0.42	0.49
26	B	0.35	42	0.5	62	20	0.81	30	0.77	40	0.74	60	0.67	0.42	0.47	0.54	0.67	0.39	0.40	0.43	0.48
32	A	0.49	172	1.8	179	20	0.75	30	0.75	40	0.71	60	0.70	0.60	0.64	0.63	0.70	0.51	0.52	0.51	0.50
32	B	0.46	131	1.4	136	20	0.72	30	0.70	40	0.66	60	0.66	0.54	0.56	0.57	0.66	0.47	0.47	0.46	0.47

表一3. 7 DF テスターと MPD から IFI を決定するのに使用したデータ (続き)

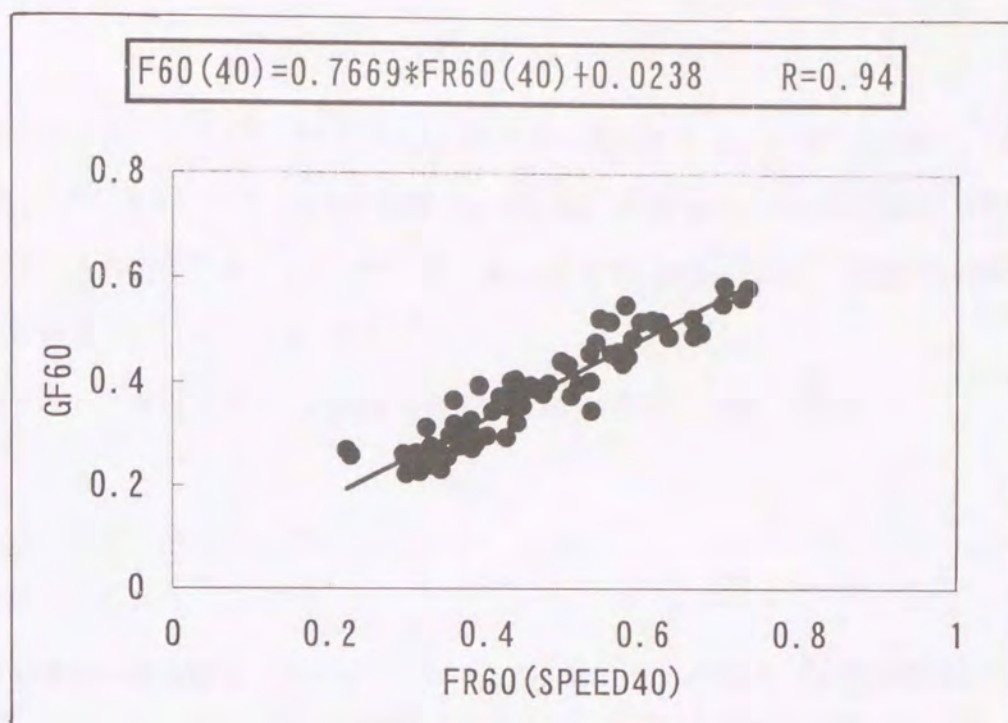
SITE	SEC	GF60	GS	MPD	S _D	S	FRS	S	FRS	S	FRS	S	FRS	FR60	FR60	FR60	FR60	F60	F60	F60	F60
				A2	MPD	20	20	30	30	40	40	60	60	20	30	40	60	20	30	40	60
33	A	0.29	53	0.5	62	20	0.65	30	0.61	40	0.59	60	0.55	0.34	0.38	0.43	0.55	0.33	0.33	0.35	0.39
33	A	0.32	53	0.7	73	20	0.64	30	0.61	40	0.58	60	0.55	0.37	0.40	0.44	0.55	0.35	0.35	0.36	0.39
33	A	0.37	60	0.8	85	20	0.61	30	0.58	40	0.55	60	0.51	0.38	0.41	0.43	0.51	0.36	0.36	0.36	0.36
33	A	0.37	70	0.7	74	20	0.52	30	0.49	40	0.47	60	0.45	0.30	0.33	0.36	0.45	0.30	0.30	0.30	0.31
40	A	0.40	169	1.5	149	20	0.58	30	0.57	40	0.55	60	0.54	0.44	0.47	0.48	0.54	0.40	0.40	0.39	0.38
40	B	0.40	165	1.2	123	20	0.53	30	0.52	40	0.51	60	0.49	0.38	0.41	0.43	0.49	0.36	0.36	0.36	0.34
42	A	0.36	75	0.7	77	20	0.68	30	0.63	40	0.58	60	0.55	0.40	0.43	0.45	0.55	0.37	0.37	0.37	0.39
42	B	0.39	96	0.6	71	20	0.70	30	0.64	40	0.60	60	0.57	0.40	0.42	0.45	0.57	0.37	0.36	0.37	0.40
50	A	0.33	64	0.6	69	20	0.55	30	0.54	40	0.51	60	0.51	0.31	0.35	0.38	0.51	0.30	0.31	0.32	0.35
50	B	0.36	62	0.7	74	20	0.58	30	0.57	40	0.56	60	0.55	0.34	0.38	0.43	0.55	0.32	0.34	0.35	0.38
51	A	0.24	68	0.7	81	20	0.44	30	0.43	40	0.43	60	0.42	0.26	0.30	0.33	0.42	0.27	0.27	0.28	0.29
51	B	0.26	89	0.6	71	20	0.42	30	0.41	40	0.41	60	0.41	0.24	0.27	0.31	0.41	0.25	0.25	0.26	0.28
52	A	0.30	85	0.8	83	20	0.46	30	0.46	40	0.45	60	0.44	0.28	0.32	0.35	0.44	0.29	0.29	0.30	0.30
52	B	0.28	86	0.8	88	20	0.48	30	0.47	40	0.46	60	0.46	0.30	0.33	0.37	0.46	0.30	0.30	0.30	0.32
53	A	0.31	72	0.5	63	20	0.52	30	0.52	40	0.51	60	0.50	0.27	0.32	0.37	0.50	0.28	0.29	0.31	0.35
53	B	0.28	65	0.6	66	20	0.53	30	0.53	40	0.53	60	0.53	0.29	0.33	0.39	0.53	0.29	0.30	0.32	0.37
56	A	0.30	85	0.9	91	20	0.53	30	0.51	40	0.50	60	0.49	0.34	0.37	0.40	0.49	0.33	0.33	0.33	0.34
56	B	0.27	66	0.8	84	20	0.52	30	0.51	40	0.49	60	0.48	0.32	0.36	0.38	0.48	0.31	0.32	0.32	0.33
57	A	0.55	183	2	193	20	0.83	30	0.81	40	0.78	60	0.74	0.67	0.69	0.70	0.74	0.57	0.57	0.56	0.53
57	B	0.56	225	2.2	213	20	0.83	30	0.83	40	0.80	60	0.78	0.69	0.72	0.73	0.78	0.58	0.58	0.58	0.56
58	A	0.39	113	1.2	118	20	0.59	30	0.57	40	0.55	60	0.52	0.42	0.44	0.46	0.52	0.38	0.38	0.38	0.36
58	B	0.40	118	1.3	135	20	0.63	30	0.63	40	0.62	60	0.58	0.46	0.50	0.53	0.58	0.42	0.42	0.43	0.41
59	A	0.26	76	0.8	84	20	0.45	30	0.45	40	0.45	60	0.43	0.28	0.31	0.35	0.43	0.28	0.28	0.29	0.30
59	B	0.26	82	0.8	82	20	0.42	30	0.42	40	0.41	60	0.40	0.26	0.29	0.32	0.40	0.27	0.27	0.27	0.27
60	A	0.26	74	0.7	79			30	0.41	40	0.38	60	0.36		0.28	0.29	0.36		0.26	0.25	0.24
60	B	0.25	74	0.8	90	20	0.44	30	0.41	40	0.38	60	0.36	0.28	0.29	0.30	0.36	0.28	0.27	0.26	0.24
61	A	0.26	62	0.6	69	20	0.51	30	0.49	40	0.46	60	0.43	0.29	0.31	0.34	0.43	0.29	0.29	0.29	0.30
61	A	0.26	62	0.6	69	20	0.43							0.24				0.26			
61	B	0.23	50	0.5	56	20	0.50	30	0.47	40	0.45	60	0.43	0.25	0.28	0.32	0.43	0.26	0.26	0.27	0.29
62	A	0.41	127	1.3	133	20	0.52	30	0.52	40	0.51	60	0.49	0.38	0.41	0.44	0.49	0.36	0.36	0.36	0.34
62	B	0.39	177	1.5	145	20	0.45	30	0.46	40	0.45	60	0.45	0.34	0.37	0.39	0.45	0.33	0.33	0.32	0.31
63	A	0.31	164	1.7	168	20	0.35	30	0.36	40	0.37	60	0.38	0.27	0.30	0.32	0.38	0.28	0.27	0.27	0.26
63	B	0.28	153	1.8	177	20	0.37	30	0.38	40	0.37	60	0.40	0.30	0.32	0.33	0.40	0.29	0.29	0.28	0.27
64	A	0.52	245	2.7	254	20	0.73	30	0.74	40	0.72	60	0.71	0.62	0.66	0.67	0.71	0.53	0.54	0.53	0.51
64	B	0.52	170	1.8	177	20	0.66	30	0.67	40	0.67	60	0.65	0.53	0.57	0.60	0.65	0.46	0.47	0.48	0.46
65	A	0.26	67	0.7	80	20	0.42	30	0.41	40	0.40	60	0.40	0.25	0.28	0.31	0.40	0.27	0.26	0.26	0.27
65	B	0.25	68	0.8	84	20	0.42	30	0.42	40	0.40	60	0.39	0.26	0.29	0.32	0.39	0.27	0.27	0.27	0.27
66	A	0.26	76	0.6	70	20	0.47	30	0.46	40	0.46	60	0.45	0.26	0.30	0.34	0.45	0.27	0.28	0.29	0.31
66	B	0.25	64	0.7	73	20	0.43	30	0.43	40	0.43	60	0.43	0.25	0.29	0.32	0.43	0.26	0.27	0.27	0.29
67	A	0.43	68	0.8	85	20	0.70	30	0.67	40	0.64	60	0.58	0.44	0.47	0.51	0.58	0.40	0.40	0.41	0.41
67	B	0.46	98	0.9	91	20	0.76	30	0.75	40	0.70	60	0.65	0.49	0.53	0.56	0.65	0.43	0.45	0.45	0.46
68	A	0.32	99	0.8	85	20	0.49	30	0.49	40	0.46	60	0.45	0.31	0.34	0.36	0.45	0.30	0.31	0.30	0.31
68	B	0.31	87	0.8	85	20	0.51	30	0.50	40	0.48	60	0.46	0.32	0.35	0.38	0.46	0.31	0.31	0.31	0.32



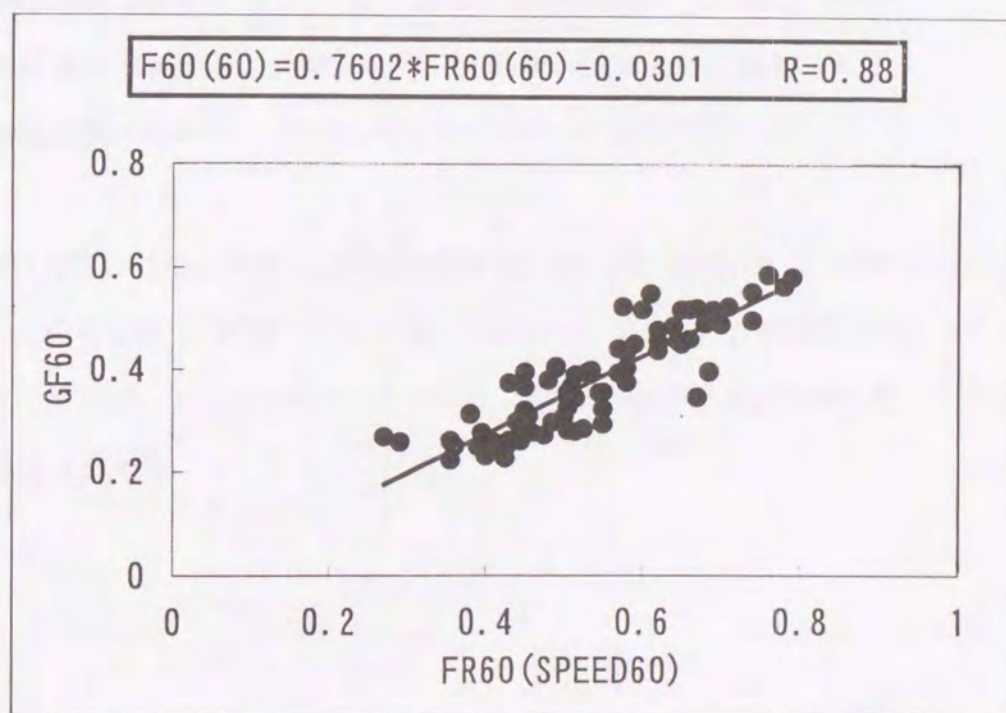
図—3. 38 MPD とDFテスター 20 km/h から求めた FR60 と GF60 の相関図



図—3. 39 MPD とDFテスター 20 km/h から求めた FR60 と GF60 の相関図



図—3. 40 MPD とDFテスター20km/hから求めたFR60とGF60の相関図



図—3. 41 MPD とDFテスター20km/hから求めたFR60とGF60の相関図

3. 6. 6 A13 (DF TESTER) のデータと MTD を用いた IFI の決定

同様に、DF テスターの測定速度 20、30、40、60 km/h での国際実験に参加したデータと A8 MTD をもとにして IFI 算出を試みしてみる。なお、この分析に用いるデータを表-3. 8 に示す。

速度ナンバーを推定する A8MTD を使用した結果は次のとおりである。

$$Sp=17.2+87.7 \times A8MTD \quad R=0.83 \quad N=66 \quad (3. 15)$$

F60 から GF60 を推定するために FR60 と GF60 の回帰の結果、測定速度別に次の式を得た。また得られた相関図を速度別に図-3. 42 ~ 図-3. 45 に示す。

$$\text{測定速度 20km/h} \quad F60=0.7389 \times FR60+0.0687 \quad R=0.94 \quad N=75$$

$$\text{測定速度 30km/h} \quad F60=0.7529 \times FR60+0.0436 \quad R=0.94 \quad N=75$$

$$\text{測定速度 40km/h} \quad F60=0.7773 \times FR60+0.0157 \quad R=0.93 \quad N=75$$

$$\text{測定速度 60km/h} \quad F60=0.7583 \times FR60-0.0288 \quad R=0.87 \quad N=75$$

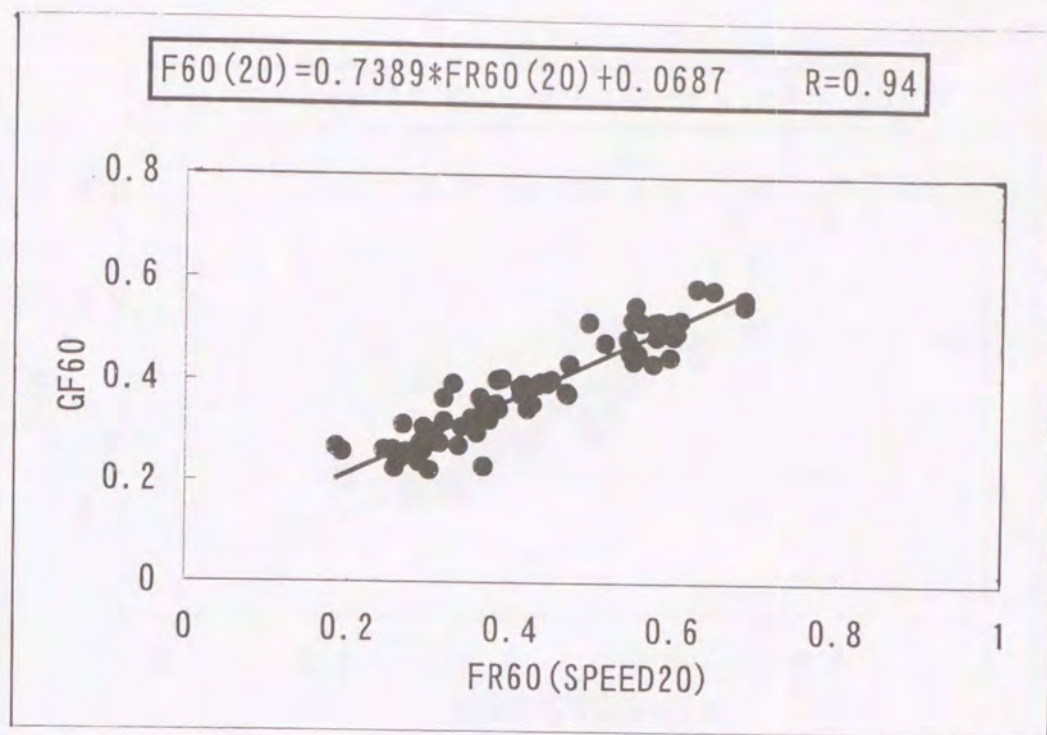
MPD を用いた時と同様に、測定速度が 20、30、40、60 km/h で良好な関係が得られた。このことから、MPD を用いても MTD を用いてもさほど相関係数に対して大きな差はみられず、どちらを用いてもきわめて精度の高い国際摩擦指標を算出することができると言える。

表-3. 8 DF テスターと MTD から IFI を決定するのに使用したデータ

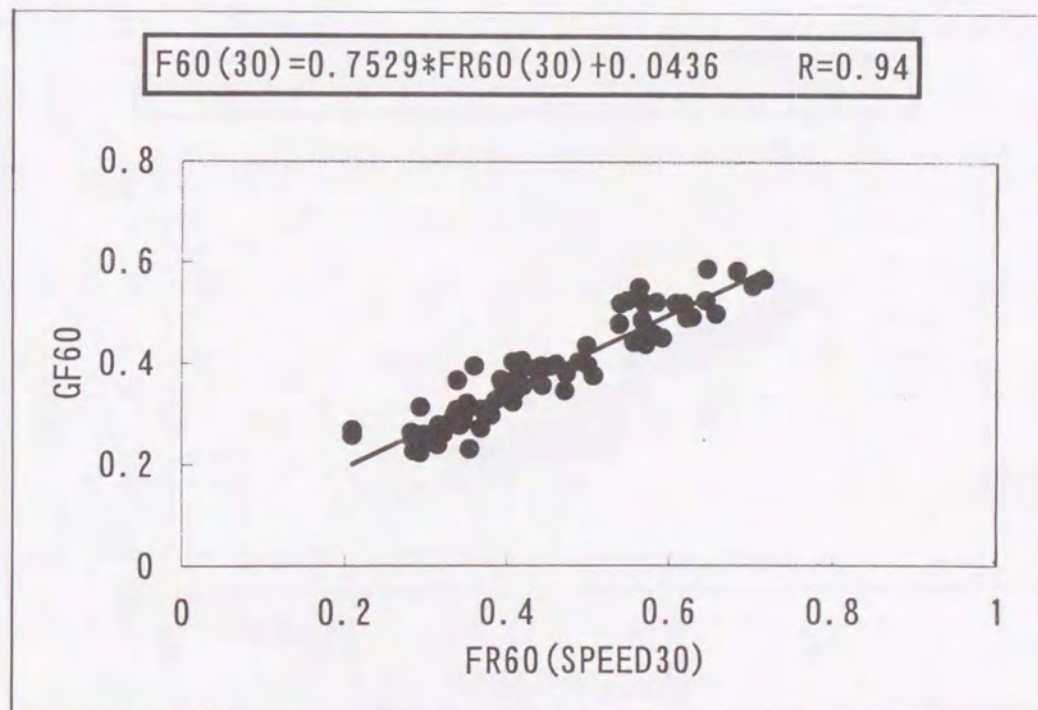
SITE	SEC	GF60	GS	MTD	Sp	S	FRS	S	FRS	S	FRS	S	FRS	FR60	FR60	FR60	FR60	F60	F60	F60	F60
				A8	MTD	20	20	30	30	40	40	60	60	20	30	40	60	20	30	40	60
1	A	0.55	375	2.2	208	20	0.67	30	0.65	40	0.62	60	0.61	0.55	0.56	0.56	0.61	0.48	0.47	0.45	0.43
1	B	0.52	334	2.3	218	20	0.70	30	0.67	40	0.66	60	0.67	0.58	0.58	0.60	0.67	0.50	0.48	0.48	0.48
2	A	0.27	150	1.2	118	20	0.26	30	0.27	40	0.26	60	0.27	0.19	0.21	0.22	0.27	0.21	0.20	0.19	0.18
2	B	0.26	170	1.2	118	20	0.27	30	0.27	40	0.27	60	0.29	0.19	0.21	0.23	0.29	0.21	0.20	0.19	0.19
4	A	0.48	91	1	103	20	0.76	30	0.72	40	0.68	60	0.62	0.52	0.54	0.56	0.62	0.45	0.45	0.45	0.44
4	B	0.46	73	1.2	118	20	0.78	30	0.74	40	0.69	60	0.62	0.56	0.57	0.58	0.62	0.48	0.48	0.47	0.44
6	A	0.36	69	0.7	80	20	0.61	30	0.58	40	0.55	60	0.51	0.37	0.40	0.42	0.51	0.34	0.34	0.35	0.35
6	B	0.35	74	0.9	92	20	0.60	30	0.57	40	0.55	60	0.52	0.38	0.41	0.44	0.52	0.35	0.35	0.36	0.36
8	A	0.28	62	0.5	59	20	0.60	30	0.57	40	0.55	60	0.52	0.31	0.34	0.39	0.52	0.29	0.30	0.32	0.36
8	B	0.28	57	0.5	58	20	0.59	30	0.56	40	0.53	60	0.51	0.29	0.33	0.37	0.51	0.28	0.29	0.31	0.35
9	A	0.38	175	1.6	161	20	0.60	30	0.57	40	0.53	60	0.48	0.47	0.47	0.47	0.48	0.41	0.40	0.38	0.34
9	B	0.37	149	1.3	131	20	0.56	30	0.52	40	0.48	60	0.43	0.41	0.41	0.41	0.43	0.37	0.36	0.34	0.30
11	A	0.38	77	0.9	97	20	0.71	30	0.69	40	0.64	60	0.58	0.47	0.51	0.52	0.58	0.42	0.42	0.42	0.41
11	B	0.44	103	1.5	150	20	0.72	30	0.68	40	0.63	60	0.57	0.55	0.56	0.55	0.57	0.48	0.46	0.44	0.40
12	A	0.59	240	1.9	185	20	0.78	30	0.76	40	0.77	60	0.76	0.63	0.65	0.69	0.76	0.53	0.53	0.55	0.55
12	B	0.58	256	2	190	20	0.80	30	0.80	40	0.80	60	0.79	0.65	0.68	0.72	0.79	0.55	0.56	0.58	0.57
13	A	0.52	297	2.9	267	20	0.67	30	0.68	40	0.66	60	0.66	0.58	0.61	0.61	0.66	0.49	0.50	0.49	0.47
13	B	0.52	279	2.9	272	20	0.69	30	0.69	40	0.67	60	0.69	0.60	0.62	0.62	0.69	0.51	0.51	0.50	0.49
15	A	0.45	295	2.9	272	20	0.69	30	0.66	40	0.61	60	0.59	0.60	0.59	0.57	0.59	0.51	0.49	0.46	0.42
15	B	0.44	354	2.8	262	20	0.67	30	0.64	40	0.62	60	0.62	0.58	0.57	0.57	0.62	0.49	0.47	0.46	0.44
17	A	0.22	63	0.8	89	20	0.47	30	0.41	40	0.38	60	0.36	0.30	0.29	0.30	0.36	0.29	0.26	0.25	0.24
17	B	0.23	135	1.2	125	20	0.51	30	0.45	40	0.43	60	0.40	0.37	0.35	0.37	0.40	0.34	0.31	0.30	0.27
18	A	0.45	223	1.9	179	20	0.69	30	0.67	40	0.65	60	0.65	0.55	0.57	0.58	0.65	0.48	0.47	0.47	0.46
18	B	0.49	166	1.8	179	20	0.68	30	0.67	40	0.65	60	0.64	0.54	0.57	0.58	0.64	0.47	0.47	0.47	0.46
19	A	0.49	198	2.3	219	20	0.72	30	0.72	40	0.72	60	0.68	0.60	0.63	0.66	0.68	0.51	0.52	0.53	0.49
19	B	0.50	237	2.4	227	20	0.72	30	0.75	40	0.72	60	0.74	0.60	0.66	0.66	0.74	0.51	0.54	0.53	0.53
21	A	0.52	181	1.6	156	20	0.73	30	0.69	40	0.64	60	0.60	0.56	0.57	0.56	0.60	0.48	0.47	0.45	0.43
21	B	0.52	168	1.6	156	20	0.71	30	0.67	40	0.62	60	0.58	0.55	0.55	0.55	0.58	0.47	0.46	0.44	0.41
24	A	0.39	97	1	107	20	0.63	30	0.60	40	0.57	60	0.54	0.43	0.45	0.47	0.54	0.39	0.38	0.38	0.38
24	B	0.39	120	1	104	20	0.61	30	0.59	40	0.56	60	0.53	0.42	0.44	0.46	0.53	0.38	0.38	0.37	0.37
26	A	0.40	50	0.6	65	20	0.82	30	0.79	40	0.75	60	0.69	0.44	0.50	0.55	0.69	0.40	0.42	0.45	0.49
26	B	0.35	42	0.5	61	20	0.81	30	0.77	40	0.74	60	0.67	0.42	0.47	0.53	0.67	0.38	0.40	0.43	0.48
32	A	0.49	172	1.6	157	20	0.75	30	0.75	40	0.71	60	0.70	0.58	0.62	0.62	0.70	0.50	0.51	0.50	0.50
32	B	0.46	131	1.5	150	20	0.72	30	0.70	40	0.66	60	0.66	0.55	0.57	0.58	0.66	0.48	0.47	0.47	0.47
33	A	0.29	53	0.4	53	20	0.65	30	0.61	40	0.59	60	0.55	0.31	0.35	0.40	0.55	0.30	0.30	0.33	0.39
33	A	0.32	53	0.7	74	20	0.64	30	0.61	40	0.58	60	0.55	0.37	0.41	0.44	0.55	0.34	0.35	0.36	0.39
33	A	0.37	60	0.7	77	20	0.61	30	0.58	40	0.55	60	0.51	0.36	0.39	0.42	0.51	0.34	0.34	0.35	0.36
33	A	0.37	70	0.7	81	20	0.52	30	0.49	40	0.47	60	0.45	0.32	0.34	0.37	0.45	0.30	0.30	0.30	0.31
40	A	0.40	169	1.4	141	20	0.58	30	0.57	40	0.55	60	0.54	0.44	0.46	0.48	0.54	0.39	0.39	0.39	0.38
40	B	0.40	165	1.2	123	20	0.53	30	0.52	40	0.51	60	0.49	0.38	0.41	0.43	0.49	0.35	0.35	0.35	0.34
42	A	0.36	75	0.8	86	20	0.68	30	0.63	40	0.58	60	0.55	0.43	0.44	0.46	0.55	0.38	0.38	0.37	0.39
42	B	0.39	96	0.8	83	20	0.70	30	0.64	40	0.60	60	0.57	0.43	0.45	0.47	0.57	0.39	0.38	0.38	0.40
50	A	0.33	64	0.8	90	20	0.55	30	0.54	40	0.51	60	0.51	0.35	0.39	0.41	0.51	0.33	0.33	0.33	0.35
50	B	0.36	62	0.9	98	20	0.58	30	0.57	40	0.56	60	0.55	0.38	0.42	0.46	0.55	0.35	0.36	0.37	0.38
51	A	0.24	68	0.9	96	20	0.44	30	0.43	40	0.43	60	0.42	0.29	0.31	0.35	0.42	0.28	0.28	0.28	0.29
51	B	0.26	89	0.9	94	20	0.42	30	0.41	40	0.41	60	0.41	0.27	0.30	0.33	0.41	0.27	0.27	0.27	0.28
52	A	0.30	85	0.9	95	20	0.46	30	0.46	40	0.45	60	0.44	0.30	0.34	0.36	0.44	0.29	0.30	0.30	0.30
52	B	0.28	86	0.9	93	20	0.48	30	0.47	40	0.46	60	0.46	0.31	0.34	0.37	0.46	0.30	0.30	0.30	0.32
53	A	0.31	72	0.6	70	20	0.52	30	0.52	40	0.51	60	0.50	0.29	0.34	0.38	0.50	0.29	0.30	0.31	0.35
53	B	0.28	65	0.6	68	20	0.53	30	0.53	40	0.53	60	0.53	0.29	0.34	0.39	0.53	0.29	0.30	0.32	0.37
56	A	0.30	85	1	102	20	0.53	30	0.51	40	0.50	60	0.49	0.36	0.38	0.41	0.49	0.33	0.33	0.34	0.34
56	B	0.27	66	0.9	92	20	0.52	30	0.51	40	0.49	60	0.48	0.34	0.37	0.39	0.48	0.32	0.32	0.32	0.33
57	A	0.55	183	2.2	211	20	0.83	30	0.81	40	0.78	60	0.74	0.69	0.70	0.71	0.74	0.58	0.57	0.57	0.53
57	B	0.56	225	2.2	211	20	0.83	30	0.83	40	0.80	60	0.78	0.69	0.72	0.73	0.78	0.58	0.58	0.58	0.56

表一3. 8 DF テスターと MTD から IFI を決定するのに使用したデータ(続き)

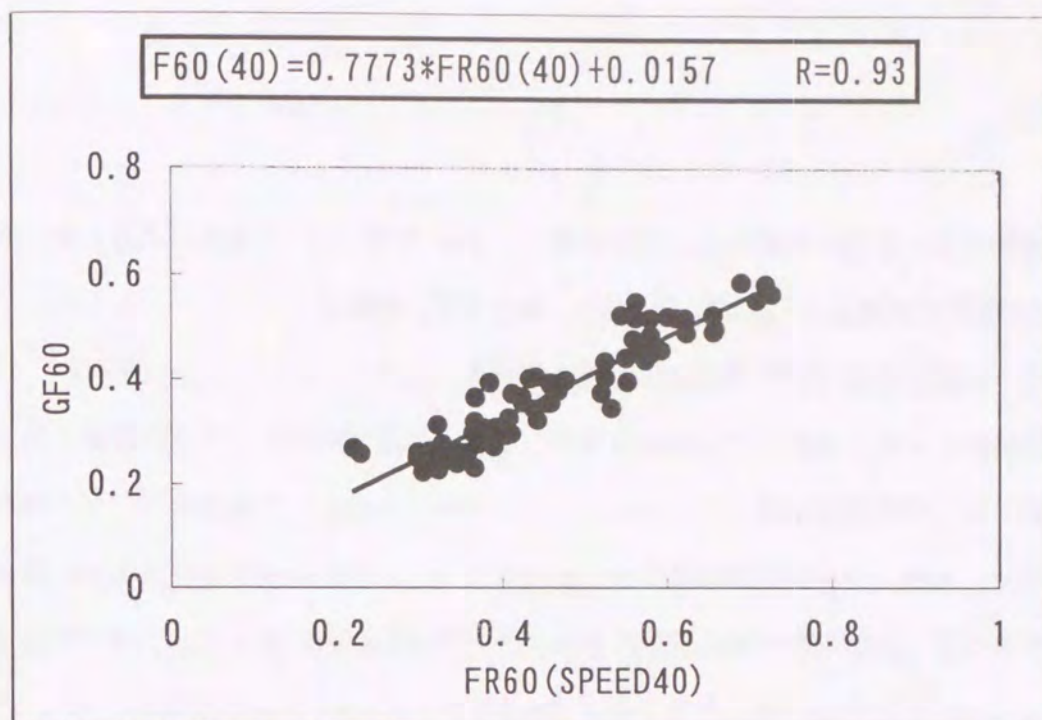
SITE	SEC	GF60	GS	MTD	Sp	S	FRS	S	FRS	S	FRS	S	FRS	FR60	FR60	FR60	FR60	F60	F60	F60	F60
				A8	MTD	20	20	30	30	40	40	60	60	20	30	40	60	20	30	40	60
58	A	0.39	113	1.1	111	20	0.59	30	0.57	40	0.55	60	0.52	0.41	0.44	0.46	0.52	0.37	0.37	0.37	0.36
58	B	0.40	118	1.2	122	20	0.63	30	0.63	40	0.62	60	0.58	0.45	0.49	0.53	0.58	0.40	0.41	0.42	0.41
59	A	0.26	76	0.8	86	20	0.45	30	0.45	40	0.45	60	0.43	0.28	0.31	0.35	0.43	0.28	0.28	0.29	0.30
59	B	0.26	82	0.8	85	20	0.42	30	0.42	40	0.41	60	0.40								
60	A	0.26	74	0.7	82			30	0.41	40	0.38	60	0.36		0.28	0.30	0.36		0.26	0.25	0.24
60	B	0.25	74	0.7	81	20	0.44	30	0.41	40	0.38	60	0.36	0.27	0.28	0.30	0.36	0.27	0.26	0.25	0.24
61	A	0.26	62	0.6	71	20	0.51	30	0.49	40	0.46	60	0.43	0.29	0.32	0.35	0.43	0.28	0.28	0.29	0.30
61	A	0.26	62	0.6	71	20	0.43							0.24				0.25			
61	B	0.23	50	0.5	60	20	0.50	30	0.47	40	0.45	60	0.43	0.26	0.29	0.32	0.43	0.26	0.26	0.27	0.29
62	A	0.41	127	1.4	137	20	0.52	30	0.52	40	0.51	60	0.49	0.39	0.42	0.44	0.49	0.36	0.36	0.36	0.34
62	B	0.39	177	1.3	128	20	0.45	30	0.46	40	0.45	60	0.45	0.33	0.36	0.38	0.45	0.31	0.31	0.31	0.31
63	A	0.31	164	1.6	158	20	0.35	30	0.36	40	0.37	60	0.38	0.27	0.29	0.32	0.38	0.27	0.26	0.27	0.26
63	B	0.28	153	1.7	163	20	0.37	30	0.38	40	0.37	60	0.40	0.29	0.32	0.33	0.40	0.28	0.28	0.27	0.27
64	A	0.52	245	2.3	218	20	0.73	30	0.74	40	0.72	60	0.71	0.61	0.64	0.66	0.71	0.52	0.53	0.53	0.51
64	B	0.52	170	1.4	139	20	0.66	30	0.67	40	0.67	60	0.65	0.50	0.54	0.58	0.65	0.43	0.45	0.47	0.46
65	A	0.26	67	0.7	80	20	0.42	30	0.41	40	0.40	60	0.40	0.26	0.28	0.31	0.40	0.26	0.26	0.26	0.27
65	B	0.25	68	0.8	89	20	0.42	30	0.42	40	0.40	60	0.39	0.27	0.30	0.32	0.39	0.27	0.27	0.26	0.27
66	A	0.26	76	0.8	84	20	0.47	30	0.46	40	0.46	60	0.45	0.29	0.32	0.36	0.45	0.28	0.29	0.29	0.31
66	B	0.25	64	0.7	82	20	0.43	30	0.43	40	0.43	60	0.43	0.26	0.30	0.33	0.43	0.26	0.27	0.27	0.29
67	A	0.43	68	1	101	20	0.70	30	0.67	40	0.64	60	0.58	0.47	0.50	0.53	0.58	0.42	0.42	0.42	0.41
67	B	0.46	98	1.2	122	20	0.76	30	0.75	40	0.70	60	0.65	0.55	0.58	0.59	0.65	0.47	0.48	0.48	0.46
68	A	0.32	99	0.9	93	20	0.49	30	0.49	40	0.46	60	0.45	0.32	0.35	0.37	0.45	0.30	0.31	0.30	0.31
68	B	0.31	87	0.9	99	20	0.51	30	0.50	40	0.48	60	0.46	0.34	0.37	0.39	0.46	0.32	0.32	0.32	0.32



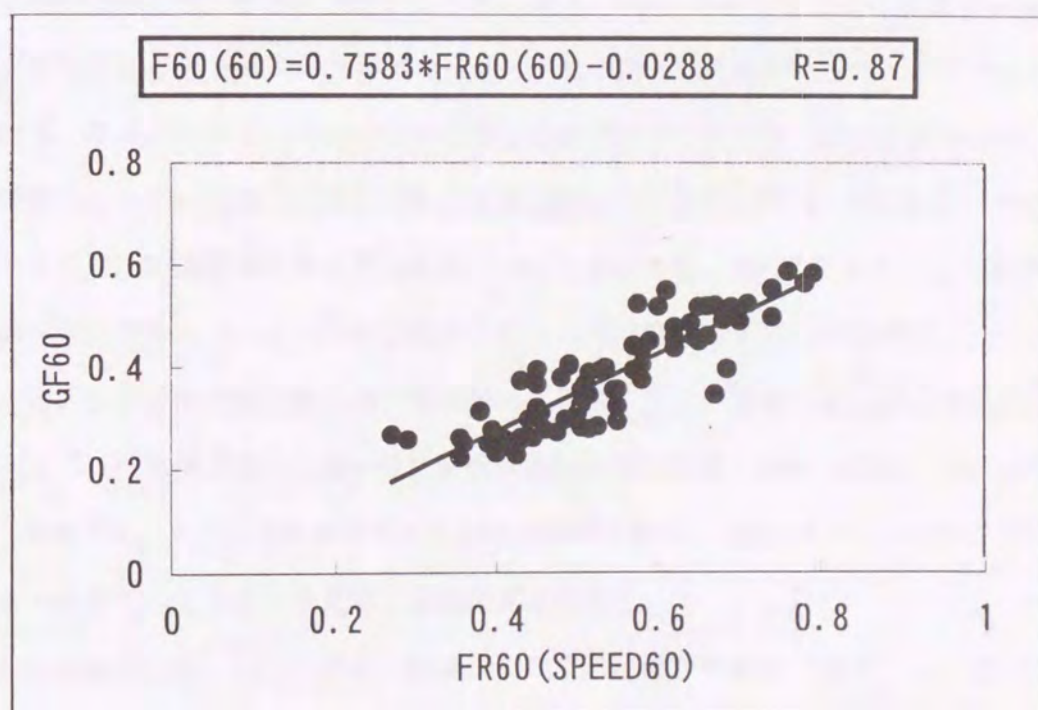
図—3. 42 MTD とD Fテスター 20 km/h から求めた FR60 と GF60 の相関図



図—3. 43 MTD とD Fテスター 30 km/h から求めた FR60 と GF60 の相関図



図—3. 4 4 MTD とD Fテスター 4 0 km/h から求めた FR60 と GF60 の相関図



図—3. 4 5 MTD とD Fテスター 6 0 km/h から求めた FR60 と GF60 の相関図

3. 7 本章のまとめ

第2章で新たに開発された DF テスターの開発目的および装置の構造と性能評価などについて述べたが、この装置は1992年に PIARC が開催した国際共同実験に参加し、ベルギーとスペインにおける56箇所の道路試験個所で他に世界各国から参加した37種類のすべり抵抗測定装置とともに測定を実施して、貴重なデータを得た。

本章では、この実験で得られたデータベースを使用して、測定原理やタイプが異なる装置によるすべり抵抗測定値と DF テスターによる測定値を比較し、現在、世界各国で使用されている装置間の関係を示す相関係数と回帰直線を把握した。この結果、DF テスターは測定速度30 km/h と60 km/h で他の装置と高い相関が見られ、90 km/h では低下する傾向にある。最も相関係数が高いのは車輪ロック方式の LCPC トレーラであり、ASTM トレーラの相関も高い。全般的にはサイドフォース方式の装置との相関が高く、スリップ方式の装置との相関が安定している。車輪ロック方式の装置は高い相関と低い相関が混合している。また、DF テスターとこれら装置の回帰直線が開発され、DF テスター測定値から他の装置の測定値を推定する方法が示された。このような関係が得られたのは日本の測定装置では DF テスターだけであるので、国内で使用されている他の装置を国外の装置と関係づけるためには、DF テスターを媒介として間接的に関係を求めざるを得ない。したがって、DF テスターはこのような関係を求めるキョジブレーション装置としての役割を果たすことができる。

一方、この国際共同実験の最大の成果は、異なる方法や装置による異なる速度におけるすべり抵抗測定値を共通の値に変換する国際摩擦指標 (IFI) を開発したことである。本章では、さらに DF テスターと IFI の関係を解析し、DF テスターとテクスチャーデータを用いて IFI を算定する関係式を求めた。

これらの結果から、DF テスターは ASTM 規格に基づく装置であるとともに、すべり抵抗測定値のグローバルスタンダード (IFI) を算出できる有用なポータブルテスターであることが実証されたことになる。

参考文献

- 1) Surface Characteristics, Report of PIARC Technical Committee on Surface Characteristics, XIX World Congress, Marrakesh, 1991
- 2) V. R. Shah and J. J. Henry: The Determination of Skid Resistance – Speed Behavior and Side Force Coefficients of Pavements, Transportation Research Record 666, p.13-18, 1978
- 3) James C Wambold, J. J. Henry, Zoltan Pado, etc.; International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, PIARC, 1995.
- 4) K. Ichihara, H. Abe and T. Sawa; Dynamic Friction Tester (DF Tester), Proc. of Second International Symposium on Road Surface Characteristics, 1992, pp.251-260, Berlin (Germany).
- 5) J. J. Henry (斎藤和夫訳) : 舗装路面のテクスチャーとすべり抵抗測定と比較と基準化に関する P I A R C 国際共同実験成果の報告
- 6) 安部裕也・山本賢二・斎藤和夫・山之口 浩 : 路面のすべり抵抗とテクスチャーの関係に関する研究、舗装、VOL. 34、No.11、建設図書、1999, pp.3-8.
- 7) 安部裕也・斎藤和夫・笠原篤・John J. Henry : 路面のすべり抵抗測定値と国際フクシヨンインデックス (IFI) の関係、土木学会北海道支部論文集、第54号、pp.512-517、1998.
- 8) Kazuo Saito, Takashi Horiguchi, Atsushi Kasahara, Hironari Abe, J. J. Henry: Skid Resistance Measurements by Two Japanese Testers and Their Relation to Texture and the International Index, Proc. of the Third International Symposium on Pavement Surface Characteristics, 1998, pp.41-56, Christchurch (New Zealand)

第4章 DFテスターとCTメーターを用いた国際摩擦指標の推定方法の検討

4.1 はじめに

道路および空港滑走路で車両が安全に走行するためには、十分なすべり抵抗が必要であることは既に述べたが、このすべり抵抗は路面のテクスチャー(texture)に影響されることが近年明らかになってきた。

同じ路面においても、すべり抵抗は速度によって変化する。このすべり抵抗の速度依存性とテクスチャーの関係が明らかにされて以来、路面のすべり抵抗の確保におけるテクスチャーの役割が注目されるようになってきた。従って、路面を維持管理する場合、単にすべり抵抗のみに注目するのではなく、テクスチャーも同時に確保しなければならないことは、第3章で述べた国際摩擦指標 (IFI) を算出する PIARC モデルの開発においても明らかにされている。

1980年代初めに、Henry と斉藤はすべり抵抗の速度依存性をテクスチャーとの関係でモデル化した Penn State Model を開発したが、このモデルが PIARC の開催した国際共同実験結果に基づいて開発された国際摩擦指標の基本モデルとして採用された。すなわち、世界各国で開発、使用されている異なるすべり抵抗測定装置により得られたすべり抵抗値を、テクスチャーを媒介として共通のスケールに換算するというグローバル・スタンダードを生み出したのである。

一方、国際摩擦指標はすべり抵抗の速度依存性を基本にしているため、速度依存性を容易に測定できるすべり抵抗測定装置があると極めて便利であるが、それを可能とする装置として DF テスターが開発された。しかし、路面の国際摩擦指標を求めるためにはテクスチャーの測定が必要であるが、テクスチャーを簡単に測定できる信頼性の高いポータブルな測定装置、特に DF テスターとセットで利用できる装置が開発されると非常に便利であり、舗装路面の維持管理の面で世界的に貢献できることになる。

そこで、著者は新しいテクスチャー測定装置の開発を試みた。この装置は DF テスターがすべり抵抗を測定する路面のゴムスライダーが通過する同一上のテクスチャーをレーザーで非接触で測定するもので、CT メータ (Circular Texture Meter) と呼んでいる。

本章では第 2 章で述べた DF テスターによるすべり抵抗測定値と第 3 章に述べた国際摩擦指標 (IFI) を算定するのに必要なテクスチャーの測定を CT メータで行い、DF テスターと CT メータを組合わせて IFI を推定する方法を検討する。

4. 2 路面のすべり抵抗とテクスチャーの関係

一般に、乾燥あるいは氷結路面のすべり抵抗は速度によりあまり変化しないが、潤滑路面では大きく変化する。図 - 4 - 1 は各種路面のすべり抵抗の範囲を示すが、潤滑路面におけるすべり抵抗値は速度が速くなるにつれて低下してくることを示している。このすべり抵抗値の速度による低下度合 (速度依存性) は路面により異なり、その相違はタイヤの性質と路面の性質に関係してくることが知られている。

その関係をタイヤの側から見ると、図 - 4. 2¹⁰⁾ に示すようにタイヤゴムのもつ 2 つの性質—粘着性 [adhesion] とヒステリシス [hysteresis] —に関係する。粘着性は路面の凹凸によるゴムの局所的な高圧で生じる分与結合から、ヒステリシスは路面の突起によるゴムの変形から生じる。この結果、すべり抵抗は路面の凹凸に関係してくることになる。舗装道路は平滑ではなく凹凸があるが、あるサイズ以下の凹凸をテクスチャー [texture] と呼んでおり図 - 4. 3⁹⁾ に示すように路面とタイヤ間で発生する種々の問題に関係する重要な路面特性である。テクスチャーは PIARC の定義によると 0.5mm 以下のサイズのミクロテクスチャー (microtexture) と 0.5mm~50mm のサイズのマクロテクスチャー (macrotexture) に分類されるが、前者は骨材表面の凹凸により形成され、タイヤの粘着性に関係し、後者は路面の骨材の配置、形状などによる凹凸により形成され、タイヤのヒステリシスに関係してくる。湿潤路面では

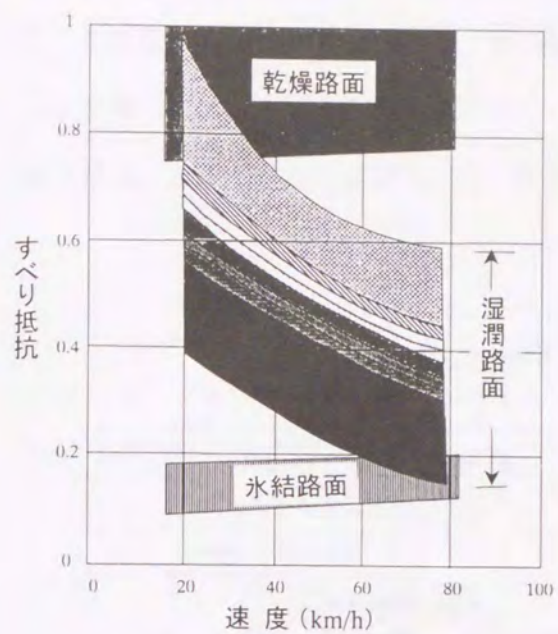


図-4. 1 路面のすべり抵抗と速度の一般的な関係

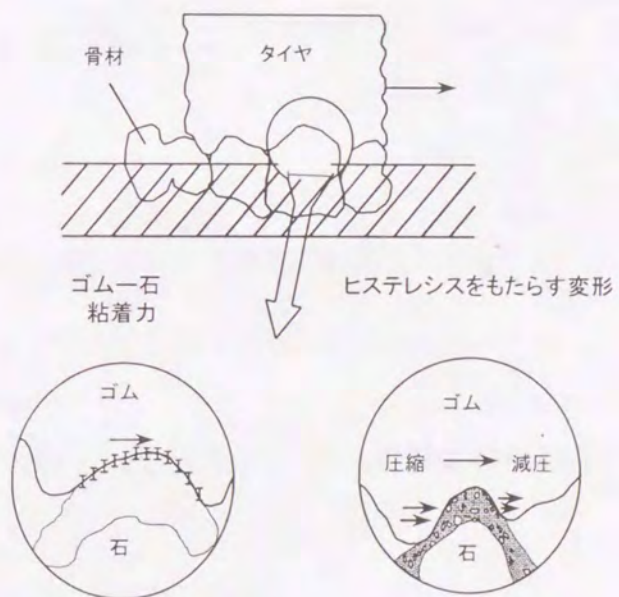
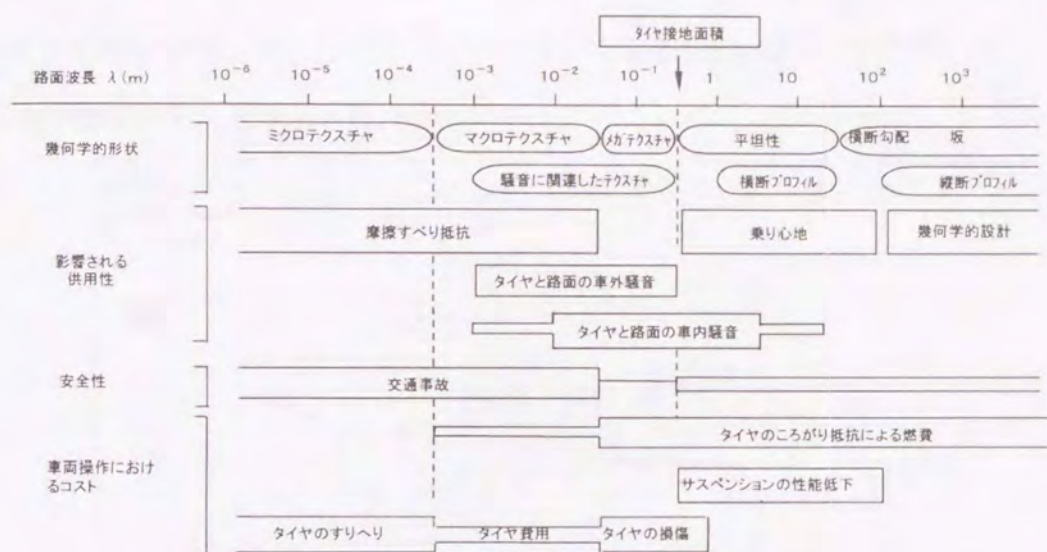


図-4. 2 粘着とヒステリシスの機構

タイヤと路面間に水が介在してすべり抵抗に影響するが、マクロテクスチャーは路面に滴を形成してすべり抵抗の速度依存性に関係し、高い速度範囲におけるすべり抵抗の確保に重要な役目を果たす。一方、ミクロテクスチャーはタイヤと路面間の水幕を破り、両者を接触させることから、低い速度でのすべり抵抗に重要な関係を持つ。



図—4. 3 PIARCによるテクスチャーの定義

4. 3 すべり抵抗・テクスチャー・速度の関係のモデル化

4. 3. 1 Penn State Model

前述のように、路面のすべり抵抗は速度が高くなるにつれて低下することが知られている。Henry と斉藤はすべり抵抗と速度の関係を表すモデルを、路面のテクスチャーをパラメータとして開発することを試みた。開発されたモデルは

$$F(S) = F_0 \cdot e^{S/S_p} \quad (4.1)$$

ここで、 $F(S)$ = 速度 S で測定されたすべり抵抗値

F_0 = 関数の切片

S_p = 速度勾配

このモデルの構造を図4.4に示すが、 F_0 は速度0における切片でマイクロテクスチャーの指標で表現される。また、 S_p はすべり抵抗の速度勾配でマクロテクスチャーの指標と関係することを示した。

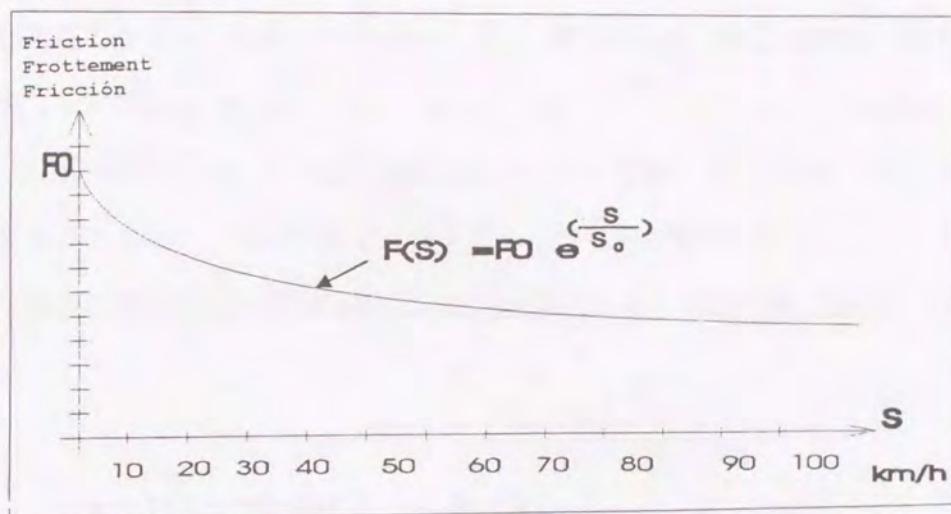


図4.4 Penn State Model の構造

4.3.2 PIARC モデルと国際摩擦指標 (IFI) の関係

既に、第3章の3.6節で国際摩擦指標 (IFI) について述べているが、IFI は路面のテクスチャーを組み込んだモデルを利用して、任意のすべり抵抗測定装置 (国際共同実験に参加した装置に限る) で任意の速度で測定したすべり抵抗値を共通の指標に変換する方法ものである。この変換する方法の基本をなすものが PIARC モデルであるが、PIARC モデルは前述の Penn State Model である (4.1) 式を次のように変形したものである。

$$F(S) = F_{60} \cdot e^{(60-S)/S_p} \quad (4.2)$$

すなわち、Penn State Modelにおける速度0における切片 F_0 を速度60 km/hにおける共通の指標に変換したすべり抵抗の値 F_{60} に置き換えたものであり、このために指数部分は S/S_p から $(60-S)/S_p$ と表している。(4.2)式におけるモデルのパラメータ、 F_{60} と S_p 、を用いて国際摩擦指標 IFI (F_{60} , S_p) としたものである。

この IFI を推定する手順として、まず対象路面の S_p を求める必要がある。第3章ではDFテストの速度20 km/hにおける測定値から F_{60} を算出する方法が最も良い結果を与えたことを示したが、その場合の S_p の推定する基本的な方法は、テクスチャー指数として ASTM E1846 に規定している平均プロフィール (MPD: mean profile depth) を用いるものである。MPD は非接触タイプの装置による路面のプロファイルから測定される2次元 (断面) 的な指数である。第3章の解析ではスエーデンのプロファイル測定装置 VTI MOBILE PROFILEMETER による MPD 測定値を用いて次式を得ている。

$$S_p = 14.0 + 90.0 \text{ MPD} \quad (R=0.94) \quad (4.3)$$

また、DF テスターで20 km/hにおけるすべり抵抗の測定値から60 km/hにおけるすべり抵抗値に変換した値、 $FR_{60_{20}}$ を用いて F_{60} を推定する方法として次式が得られている。

$$F_{60} = 0.08 + 0.717 \cdot FR_{60_{20}} \quad (R=0.95) \quad (4.4)$$

しかし、スエーデンのテクスチャー装置は大型車両を用いており、世界中の任意の場所へ移動して路面のマクロテクスチャーを測定することは困難である。そこで、従来から現場で使用されてきた簡便なマクロテクスチャー測定装置である ASTM E965-

96に規定するによる平均テクスチャー深（MTD：mean texture depth）を用いる方法について検討している。MTDはサンドパッチ法(sand-patch method)により得られる3次元(容積)的なテクスチャー指数である。第3章の解析では(4.3)式の代りに次式を得ている。

$$Sp=17.2+87.7 \text{ MTD} \quad (R=0.83) \quad (4.5)$$

この式の相関係数は $R=0.83$ とあまり高くないが、(4.3)式の代わりに簡便な Sp の推定方法として実用的に使用可能である。

また、この MTD から Sp を推定する式を用いて、DF テスターで速度 20 km/h におけるすべり抵抗測定値から $F60$ を推定する式として次式を得ている。

$$F60=0.07+0.739 \cdot FR60_{20} \quad (R=0.94) \quad (4.6)$$

4.4 新しいテクスチャー測定装置の開発

以上、これまでの研究成果を踏まえて、すべり抵抗とテクスチャーの関係を IFI の推定方法と関連して示したが、ここで明らかにされたように IFI の推定においてはテクスチャーの測定方法が重要な鍵になる。現在使用されているテクスチャー測定装置の多くは車両走行タイプの大型装置であり、ポータブルでより簡便なテクスチャー測定装置の開発が望まれている。

そこで、ポータブルで簡便なすべり測定装置として ASTM に規格化された DF テスターとセットで使えるような最新技術を導入した新しいテクスチャー測定装置の開発を試みた。ここでは、開発されたテクスチャー測定装置を用いた IFI の推定の可能性について検討する。

4. 4. 1 Circular Texture Meter (CT メータ) の開発

D F テスターですべり抵抗を測定した路面の軌跡上のテクスチャーを厳密に測定することを目的として開発された C T メータは、 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 27\text{ cm}$ の箱型であり、重量は 13 kg である。

その測定装置の概要は写真 4. 1 に示すように、D F テスターと同様の外形である。C T メータは写真 4. 2 に示すように、C C D レーザ変位センサーが半径 142 mm の円上を回転するアームに取り付けられており、D F テスターが摩擦を測定する円と同一円上のマクロテクスチャーを非接触で測定することができる。

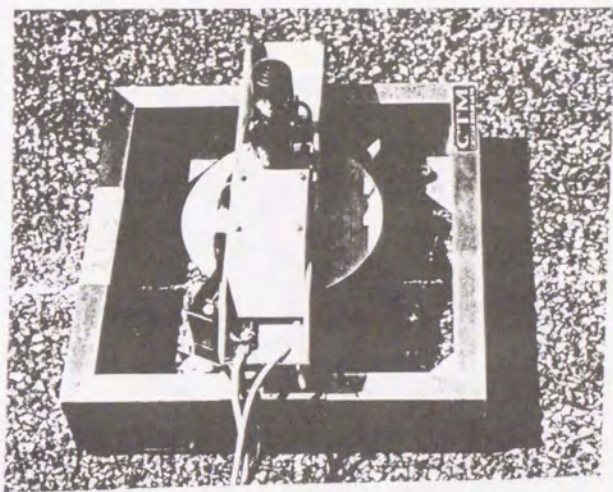


写真 4. 1 C T メータの概観

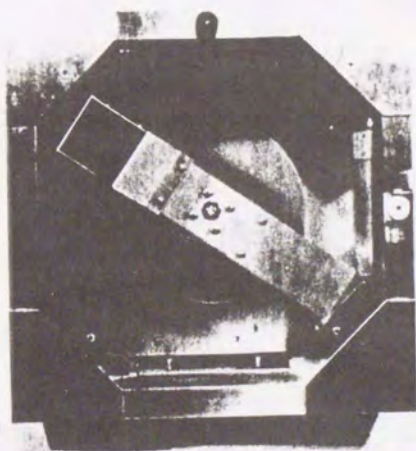
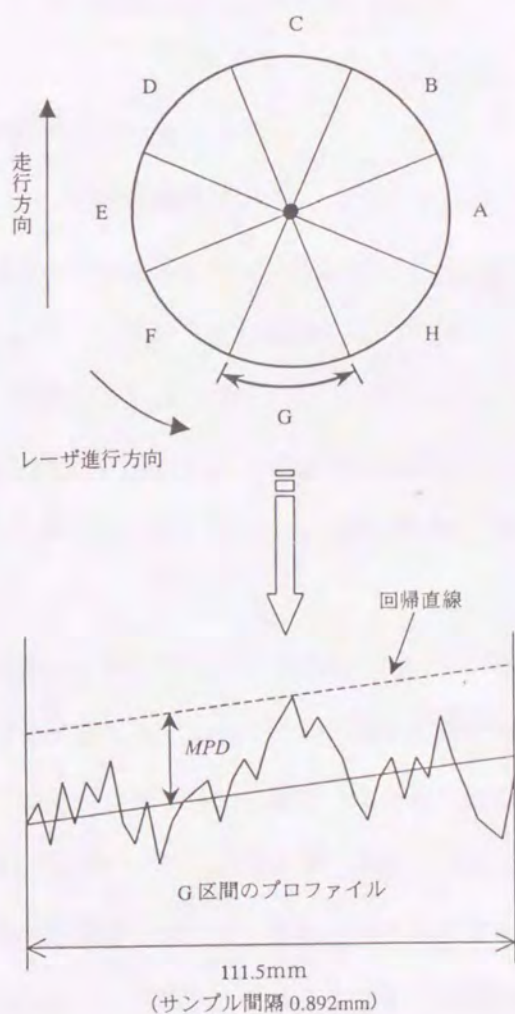


写真 4. 2 C T メータの C C D レーザ変位センサー

CTメータの測定スイッチを入れると、CCDレーザ変位センサーが回転し、測定を開始する。CCDレーザ変位センサーが1回転した後、測定値はRS232ケーブルを通してパーソナルコンピュータに読み込まれる。測定およびデータの読み込みに要する時間はわずか40sec程度であり、非常に短い時間で路面のマクロテクスチャーを測定することができる。CTメータの測定、設定、測定プロファイルの表示および後述するMPDの算出などはWindows上で稼動する専用ソフトウェアによって容易に行うことができる。

CTメータが測定するプロファイルの長さ（円周）892mmであり、サンプリング間隔はプロファイルの長さの1000分の1である0.892mmに設定している。



図—4・5 CTメータの測定軌跡とMPDの算出方法

測定されたプロファイルをは図-4. 5に示すように長さ111.5mmの1回転の軌跡を8区間(A~H)に等分し、各区間毎のプロファイル(MPD)を算出する。AとE区間のMPDは車両の走行方向の、CとG区間のMPDは進行方向に直角方向のテクスチャー測定値を与える。また、8区間全体の平均したMPDを測定することもできる。MPDの算出は図-4. 5に示すように、プロファイルの回帰直線とピーク高さとの差で表される。

本研究ではDFテスターによって測定されるすべり抵抗とCTメータによって測定されるマクロテクスチャーの関係を解析することに主眼を置いていることから、車両走行方向におけるマクロテクスチャー(C、G区間)のみでなく、すべての区間におけるMPDを算出し、その平均値を解析に用いることとした。

4. 4. 2 解析対象とした舗装データ

解析対象とした舗装データは2種類である。1つのデータセットは1998年にアメリカのNASA(Wallops Flight Facility, Norfolk, Virginia)の滑走路における23箇所の試験路面で、サンドパッチ法と比較実験を行ったデータである。そのデータを表-4. 1に示す。この測定結果のうち、CTメータ測定値は図-4. 4に示す8区間のそれぞれ対面する区間の平均値と区間全体の平均値を示している。

この測定実験ではCTメータとサンドパッチ法のほかに、砂拡大器を用いてマクロテクスチャーを測定した。

サンドパッチ法は、写真4. 3に示すような装置を用いて、既知の容積の砂を路面上に形に広げ、その直径を測定する方法であり、砂の容積を円形に広げられた砂の面積で除することにより、砂層の平均深さ(MTD)を測定する方法である。一方、砂拡大器はわが国独自の測定方法であり、スプレッド(砂拡大器)を用いて砂を幅5cmの長方形状に広げ、その面積から砂層の平均深さ(MTD)を測定する方法である。

その計算方法は、写真4. 3で示されているように、規定の体積を路面に拡大した円形の面積を求め、次式から平均テクスチャー深さ(MTD)を算出する(ASTM E965)。

表-4. 1 NASA路面試験施設におけるサンドパッチ法とCTメーター測定値

surface	MTD	CTM(A-E)	CTM(B-F)	CTM(C-G)	CTM(D-H)	CTM(ave)	BPN
A	0.47	0.47	0.55	0.43	0.55	0.5	53.2
B	1.62	1.99	2.1	1.17	2.02	1.82	65
C	1.95	2.4	2.52	0.95	2.6	2.11	65.8
D	0.56	0.64	0.58	0.69	0.8	0.68	51.1
E	1.01	1.1	1.04	1.15	1.14	1.11	53.9
F	1.76	2.46	1.83	1.75	2.01	2.01	65.3
G	2.21	2.81	2.76	2.74	2.5	2.7	66.4
K	0.48	0.69	0.61	0.63	0.69	0.65	43.1
K0	0.72	1.09	0.71	0.88	0.87	0.82	56.2
S0	0.5	0.46	0.51	0.49	0.46	0.48	54
S1	0.73	0.57	0.63	0.67	0.73	0.65	65
S2	0.7	0.81	0.73	0.73	1	0.82	63.7
S3	1.03	1.02	1.21	1.13	1.4	1.19	63.3
S4	2.29	2.56	2.23	2.6	2.36	2.43	66.3
S5	1.31	1.22	1.46	1.14	1.33	1.29	67.3
S6	1.04	1.44	1.19	1.08	0.92	1.15	70.1
R1	0.47	0.57	0.64	0.58	0.49	0.57	61.9
R2	0.52	0.64	0.63	0.71	0.81	0.69	63.3
R3	0.5	0.68	0.61	0.59	0.61	0.62	49.5
R4	1.55	1.52	1.44	1.45	1.34	1.44	73.8
WHITE PAN	0.27	0.41	0.32	0.27	0.25	0.31	31.6
RED PAN	0.44	0.75	0.57	0.53	0.5	0.58	44.6
BLUE PAN	0.64	0.51	0.55	0.48	0.45	0.5	67.4

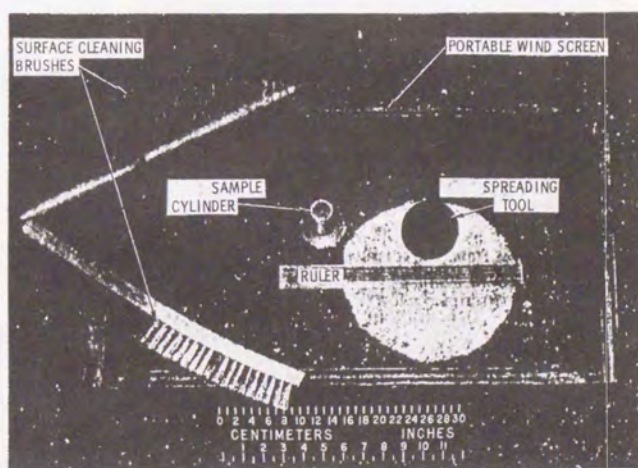


写真4. 3 サンドパッチ測定装置

$$MTD = 4V / \pi D^2 \quad (4.7)$$

ここで、V=散布する砂の容積

D=円形に拡大した砂の半径

写真4. 4にNASAで測定中のサンドパッチ法と砂拡大器の写真を示す。

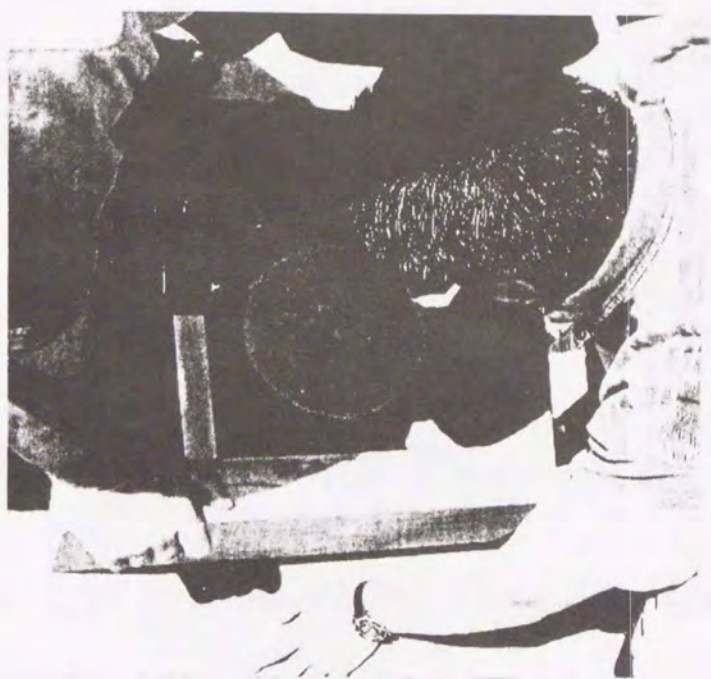


写真4. 4 サンドパッチ法と砂拡大器によるMTDの測定（NASA、1999年）

4. 4. 3 CTメーター測定値の妥当性の検討

開発したCTメーターの測定値がサンドパッチの測定値とどのような関係にあるかを検討するために、NASAにおいて測定されたデータセットを用いて解析した。サンドパッチ法によるMTDとCTメーターの全区間平均MPDの関係を図-4. 6に示す。両者の回帰させて次式が得られた。

$$MTD_{\text{Sandpatch}} = 0.019 + 0.889 MPD_{\text{Ctmeter}} \quad (4.8)$$

この式の相関関係は $R = 0.985$ となり、CTメーターの測定値MPDはサンドパッチ法の測定値MTDとほぼ一致することが示された。また、車両の走行方向に平行するAとE区間のMPDとMTDの関係では、全区間の平均値の場合と同様の高い相関係数（ $R = 0.967$ ）が得られている。

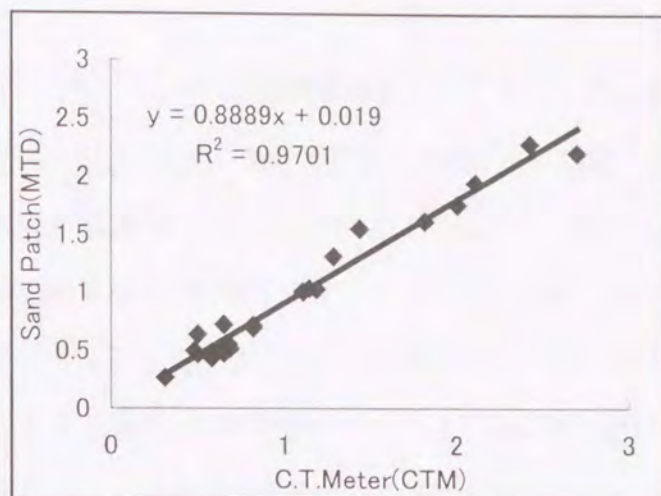


図-4. 6 C Tメータの平均MPDとサンドパッチ法のMTDの関係

このことから、C Tメータによるマクロテクスチャーの測定値は従来から簡便な方法としてアメリカを中心に広く使用されているサンドパッチ法を代替する方法として極めて有効であることが示されたといえる。

4. 4. 4 C TメーターとDFテスターを用いた I F I の推定方法

開発されたC Tメーターの測定値MPDはサンドパッチ法によるMTDと一致する非常に良い回帰式が得られたことから、P I A R C国際共同実験で提案された国際摩擦指標 I F I (F 6 0, S p) の算定に、C Tメーターの測定値を利用することが可能となる。すなわち、式(3)のサンドパッチ法による MTD の代わりに式(4. 4)のC TメーターによるMPDを代入してS_pを推定し、DFテスターによる速度20 Km/hにおけるすべり測定値からP 6 0を算定することである。

すなわち、(4. 5)式の MTD の代わりに(4. 8)の MTD_{Sandpatch}を用いて、字式からS_pを推定するものである。

$$S_p = 18.9 + 78.0 * MPD_{CTmeter} \quad (4. 9)$$

4. 5 DF テスターと CT メータ測定値の舗装マネジメントへの応用

第3章でDF テスターを用いて国際摩擦指標、IFI (F60, Sp) のF60を求める関係式が得られた。また、本章ではこの指標のSpを新しく開発されたCTメータ測定値から推定する方法を検討したが、ここではIFIを利用してDF テスターとCTメータの測定値を舗装路面のマネジメントへ応用する方法について検討する

舗装管理者がIFIのある水準、すなわちIFI (F60*, Sp*) を確保した路面管理をしようとする場合、対象路面のすべり抵抗測定値とテクスチャー測定値を用いて、その路面において確保すべき最小のすべり抵抗値FRS_{min}とテクスチャー最小値TX_{min}をPIARCモデルのSpとテクスチャーの関係式に代入すると次式が得られる。

$$Sp = a + bTX_{min} \quad (4.10)$$

また、F60を求める式に代入すると、

$$F60 = A + B * FRS_{min} e^{(S-60)/(a+bTX)} \quad (4.11)$$

(4.10) 式と (4.11) 式からそれぞれTX_{min}とFRS_{min}を求めると、

$$TX_{min} = (Sp* - a) / b \quad (4.12)$$

$$FRS_{min} = \{(F60 - A) / B\} e^{[(60 - S) / (a + bTX)]} \quad (4.13)$$

が得られる。

(4. 12) 式の a 、 b はテクスチャー測定装置について定められた値であり、CTメータを用いた場合、本章で得られた(4. 9)の係数となる。また、(4. 13)式 A 、 B はすべり測定装置について定められた値であり、DFテスターを用いた場合、(4. 6)式の係数を用いることができる。

いま、 $IFI^* \{F60^* = 0.3, Sp^* = 100 \text{ Km/h}\}$ に対する例として、 20 Km/h におけるDFテスター測定値とCTメータの測定値 $MPD_{CTmeter}$ の最小値(管理限界)を求めると次のようになる。

$$TX_{min} = (Sp^* - a) / b = (100 - 18.9) / 78.0 = 1.04$$

$$FR20min = FR_{Smin} = \{(F60 - A) / S\} e^{[(60 - S) / (a + b \times TX)]}$$

$$= \{0.3 - 0.07\} e^{(60 - 20) / (18.9 + 78.0 MPD_{CTmeter})}$$

$$= 0.23 e^{1 / (0.473 + 1.950 MPD_{CTmeter})}$$

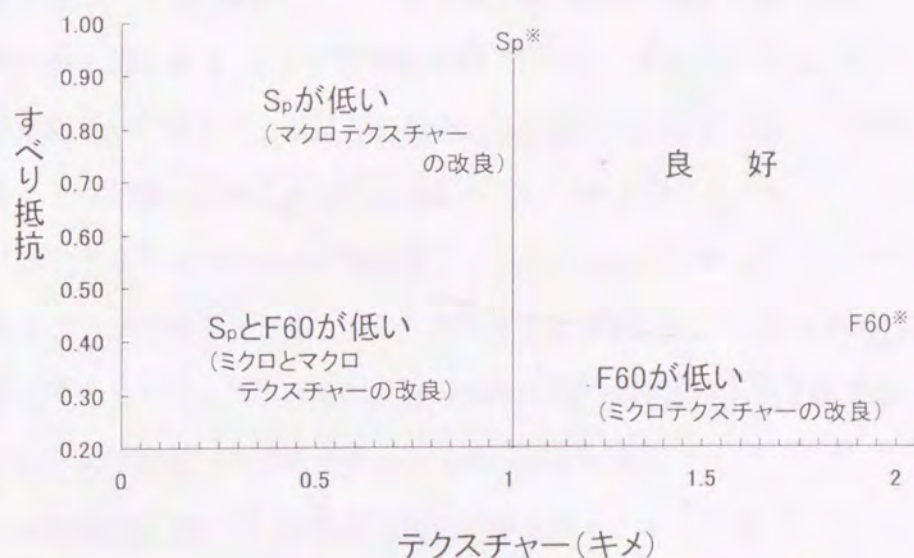


図-4. 7 DFテスターとCTメータを使用した舗装マネジメントの例

この結果をプロットすると図-4. 7のようになる。すなわち、管理対象とする路面の2つの測定値が得られると、その値を図中にプロットすることにより、路面性状を改善する指針が得られることになる。

4. 6 本章のまとめ

本章ではこれまで研究を行ってきた舗装路面のすべり抵抗とテクスチャーの関係について、PIARCの国際共同実験及びデータ解析に参加して得た成果をまとめ、新しく開発したテクスチャー測定装置について、米国NASA (Wallops) の滑走路面における測定実験のデータを解析した。

CTメーターはDFテスターですべり抵抗を測定する路面の軌跡と同じ円周上のマクロテクスチャーをCCDレーザ変位センサーで非接触により測定する装置であり、非常に短時間で容易に路面の平均プロファイル(MPD)を測定できるものである。

NASAのデータセットを用いて解析した結果は、従来の簡易にテクスチャーを測定するサンドパッチ法によるテクスチャー測定値とほぼ一致する高い相関が得られた。この結果から、第3章で述べた国際摩擦指標(F60、Sp)のうち、テクスチャー測定値から求められるすべり抵抗の速度依存性を表すSpをCTメータの測定値から算出することが可能であることが示された。

さらに、DFテスターのすべり測定値とこの算出されたSpを組み合わせることでIFIを算出することができることから、CTメータとDFテスターの測定値から国際摩擦指標を算出することにより、世界の任意の場所における路面のIFIを求める方法を確立することの可能性が示されたことになる。

また、国際摩擦指標を用いて路面管理の水準を設定すると、DFテスターとCTメータの測定値から対象路面がこの管理水準を満足するかどうか、すべり抵抗とテクスチャーの両面から改善すべき性質を判断する方法について提案している。

参考文献

- 1) Kazuo SAITO and J.J.HENRY : Development of Models for Relating Pavement Texture to Skid Resistance and Their Use for Pavement Management Systems, Proc. The International Conference on Roads and Road Transport Problems, 1988, pp.36-43.
- 2) 斎藤和夫・J.J.HENRY : 舗装路面の粗さとすべり抵抗の関係に関する研究
交通工学、Vol.23, No.4, 1988, pp.19-27.
- 3) PIARC : Report of International Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, 1995.
- 4) 斎藤和夫 : 国際摩擦指標 (I F I) の開発ーすべり抵抗測定値の基準化への挑戦、
土木学会誌、Vol.83, March, 1998, pp.27-28.
- 5) 斎藤和夫・安部裕也・笠原 篤・堀口 敬 : 路面のすべり抵抗と速度依存性を測定するポータブルテストの開発、土木学会北海道支部論文報告集 第52号(B)、
1996, pp.530-535.
- 6) K.SAITOU, A.KASAHARA, H.ABE and J.J.HENRY : Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and Its Speed Dependency on Pavement Surfaces, TRR 1536 ,
1996, pp45-51.
- 7) ASTM STANDARDIZATION NEWS, Society News, Dec. 1998, pp.58.
- 8) R. R. HEGMON : Tire - Pavement Interaction, PUBLIC ROADS,
Vol. 51, No.1, 1987, pp.5-11.
- 9) 安部・斎藤・笠原・川村・Henry : 路面のすべり抵抗値と国際フリクションインデックス (I F I) の関係、土木学会北海道支部論文報告集、
(第Ⅱ、第Ⅳ部門)、第54号(B)、1998, pp.512-517.
- 10) 安部裕也、山本賢二、斎藤和夫、山之口浩 : 「路面のすべり抵抗とテクスチャーの関係に関する研究」舗装 1999年11月号 Vol. 34

第5章 DFテスターSタイプの性能評価と歩道路面のすべり抵抗測定

5・1 研究の目的

1974年に Nacional Safty Council が発行した“事故白書”によれば「年間家庭内で800万件の転倒があり、そのうち160万件は障害が残り、9600件は死亡事故である。死亡事故のほとんどが65歳以上の老人に起こったものである。」と報じている。また、1966年ドイツの Schuster の論文で「一年に2508件の事故があり、その93%が平らなところでの転倒である。」¹⁾と報告している。今から25から30年以前ですらこのような事故が発生していたが、急速な高齢化が進む日本でも近い将来において問題を提起するであろうと思われる。

すべり現象やすべりによる転倒の原因を総て完全に理解するには、運動科学の完全な知識、人間の行動に関する力学及び解剖学の原理の研究が必要だそうである。これは非常に難しいことである。しかし、床材や歩道用舗装材と皮靴やスリッパまたはゴム靴との間の摩擦はすべりの大きなファクターであることは間違いないはずである。

歩行が安全に行えるためには歩道路面や各種床材の摩擦抵抗を測定することが必要になる。James の“*What is a Safe Floor Finish*”で「床のすべり抵抗をコントロールする最大のパラメータは静止摩擦力である。」と主張しているように、人が歩行する場合は動摩擦係数と静摩擦係数が関係してくる。

そこで、本論文の第2章では、歩行速度における動摩擦係数を測定するとともに、静止摩擦係数をも測定できる新しく開発したDFテスターSタイプの構造などについて述べたが、そこで示した開発目標を再掲すると

- a) 静止摩擦係数と速度に対応した動摩擦係数が測定できること、
- b) 乾燥状態と雨の日を考えた湿潤状態で測定できること、
- c) 目地や低い段差があっても測定できること、
- d) 傾斜している舗装面でも測定できること、

- e) 靴底材料の交換が可能なこと、
- f) 測定機が軽量で屋外でも測定できること、
- g) 測定結果が記録紙などに残ること、

であった。開発されたDFテスターSタイプはこのうちのb), d), e), f), g) の項目はすでに満たしているが、他の項目についても評価することが必要である。

また、第2章で説明した通り、DFテスターSタイプは静止摩擦と低速度摩擦を測定する装置である。『歩行者が舗装の上を歩行する際の着地、体位移動、蹴りあげにおいてすべりを抑制する力は静止摩擦力である。』とJames M. Miller²⁾が言うように、人が歩く場合は動摩擦係数だけではなく静止摩擦係数が大いに関係してくる。一般的に言えば静止摩擦は動摩擦より値が高いのが普通である。しかし多くの実験の中で逆転する場合、すなわち動摩擦が静止摩擦より高い値を示す場合もある。

そこで、本章では舗装材の凹凸の量と靴底ゴムの影響、舗装材のテクスチャーと目地の影響などいくつかの項目について、動摩擦係数と静止摩擦係数を比較することによって、DFテスターSタイプの性能を評価するとともに、実際の歩道路面において測定した結果を示し、開発された装置の実用性を評価することを目的としている。

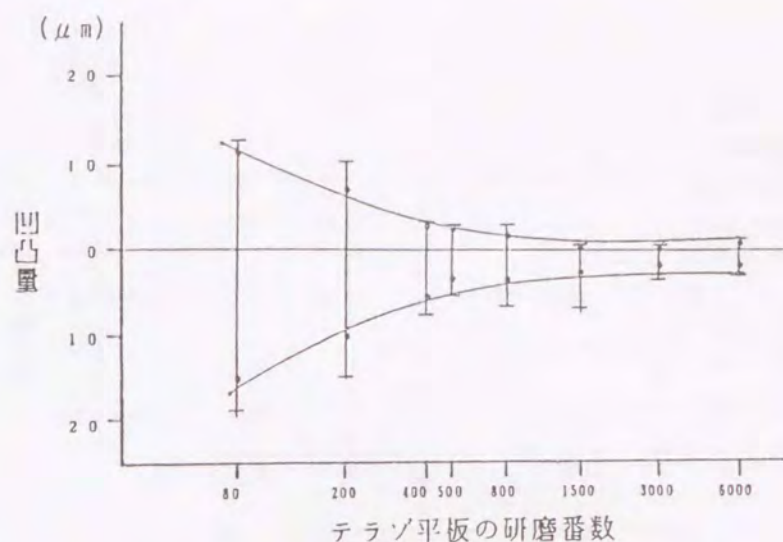
5. 2 DFテスターSタイプの性能評価³⁾

5. 2. 1 舗装材の凹凸量と靴底ゴムの影響

歩道ですべり易い材料は研磨されている材料が多いが、材料の表面形状が摩擦係数に正確に反映されていないと測定装置として機能しない。また、靴底材質が異なると測定結果に差が生じることになる。

そこで、表面が研磨された舗装材の凹凸量と摩擦係数の関係、靴底材料の違いによる測定結果の影響を調べる目的で、テラゾ平板を用いて検討した。テラゾ平板は80番から6000番の研磨砥石で研磨した7種類の材料を用い、靴底ゴムはASTM標準掘ゴム（標準装備）、カジュアルシューズ、2種類の運動靴ゴムの計4種類の材料を用

いた。なお、テラゾ平板の凹凸は表面粗さ測定試験機を用いて実測したが、その結果を図—5・1に示す。

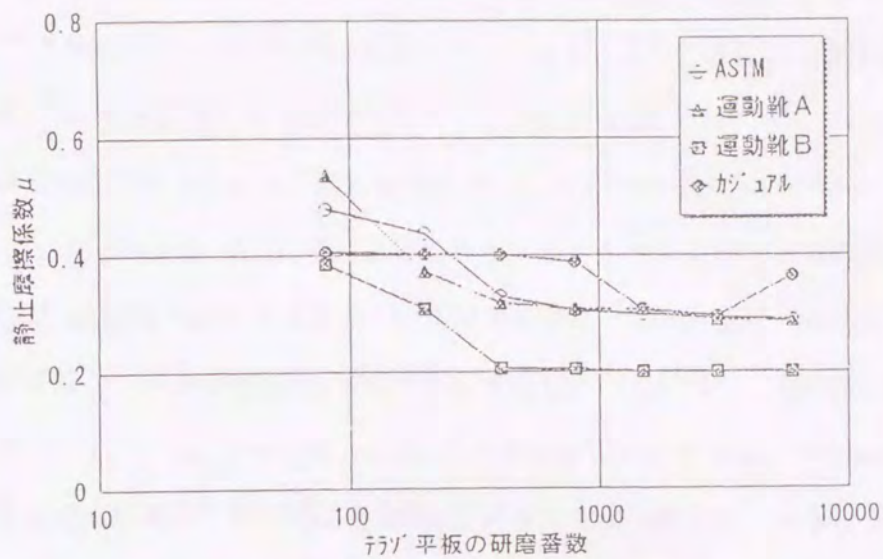


図—5・1 荒さ測定試験機による凹凸測定結果

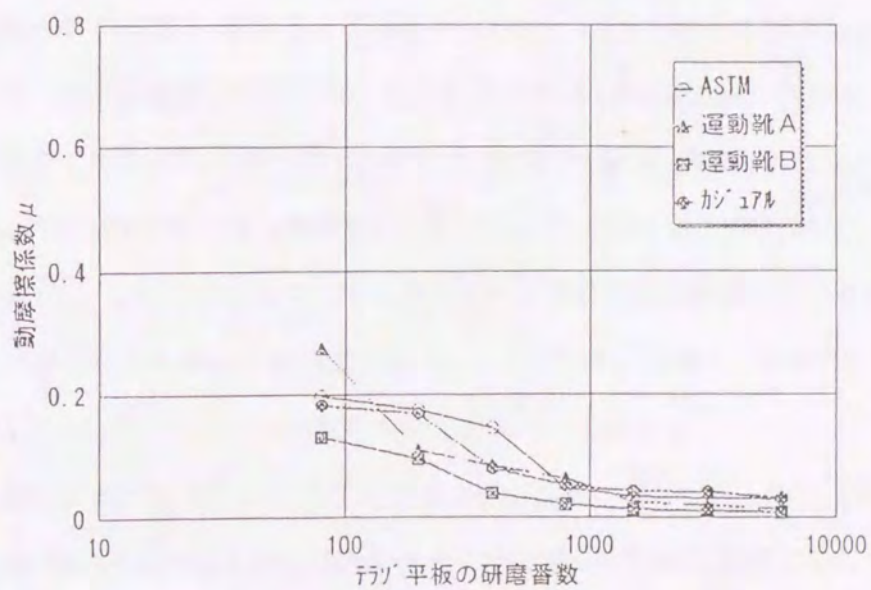
表面粗さ測定試験機で得られた凹凸量は、研磨番数6000番から400番までは1.0mμ前後の凹凸量で、200番以下の粗い研磨になると凹凸量が2.5～3.0mμと大きくなる。これを摩擦係数の測定結果と比較すると、静止摩擦係数について図—5・2に、動摩擦係数について図—5・3に示す。

静止摩擦係数は6000番から400番まではほとんど変化が見られないが、200番以下の粗い研磨になると摩擦係数が大きくなる傾向が見られ、表面粗さ試験機の測定結果と同じ傾向が見られた。また、動摩擦係数についても同様の傾向が見られた。これらの結果から、DFテスターSタイプのすべり測定装置は平滑度の高い材料の静止摩擦係数と動摩擦係数の両方を測定できることが示された。

また、摩擦係数の測定回数や測定結果の再現性についても検討した。その結果、測定装置を動かさずに同じ位置で測定を繰り返した場合、材質によってはスライダーの回転円周長上にゴムの影響が出て、測定値が低下する傾向が見られたが、測定場所を移動すると測定値の変動は5%以下になり、舗装材の測定としては十分な精度であると考えた。測定値は3回以上の測定の平均値を取って摩擦係数とした。



図一5・2 テラゾ平板の静摩擦係数測定結果



図一5・3 テラゾ平板の動摩擦係数測定結果

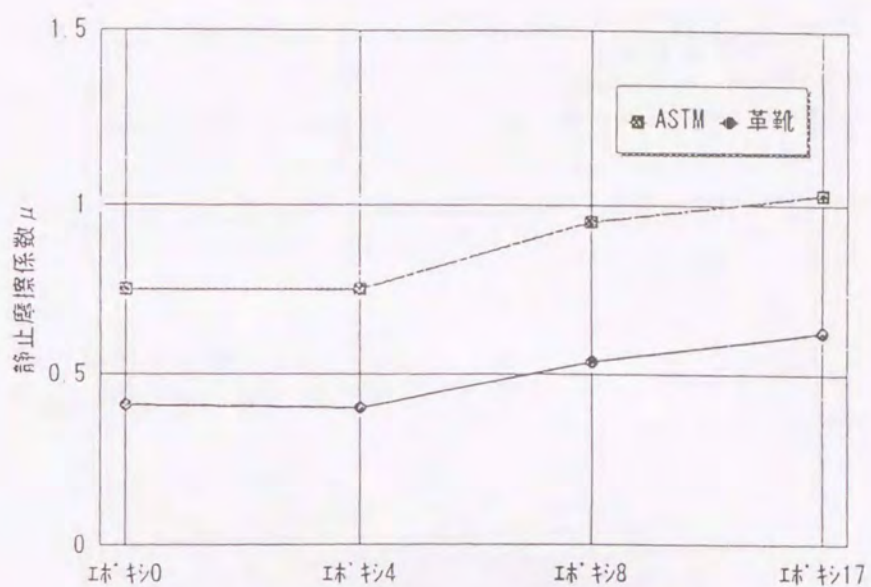
5・2・2 舗装材のテクスチャーと目地の影響

建物で使われている床材は、濡れた状態で使用することを対象としておらず、樹脂系の材料が多く用いられている。これらの材料は、乾燥状態で測定すると高い摩擦係数を示すが、湿潤状態では摩擦係数が非常に小さくなる。また、舗装材の滑り抵抗性を大きくするには、舗装表面に凹凸を付けることが行われ、舗装表面に溝をつけたり、ブロック目地の凹凸で歩行時の滑り抵抗性を大きくすることが考えられている。本測定装置でも、ゴムの回転円周長上に溝があると摩擦係数が大きく変化する可能性がある。

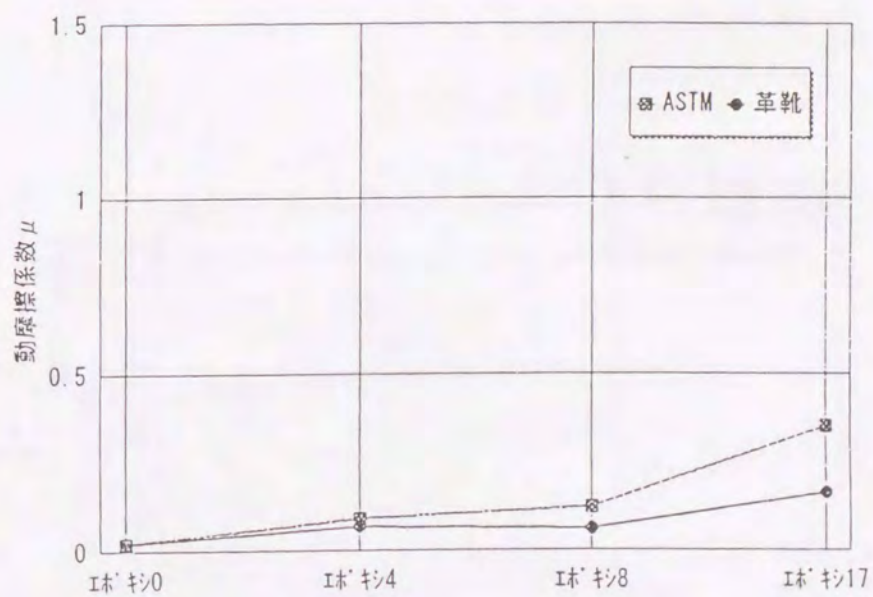
そこで、舗装材の溝やテクスチャーが摩擦係数にどの程度影響するかを知る目的で、非常に平滑なエポキシ樹脂と、表面がざらざらしているエポキシモルタルを用いて、 $45 \times 45 \times 1.5$ cm の平板をつくり、表面溝を全く切っていない平滑な平板（エポキシ0またはエポキシモルタル0と呼ぶ）、メッシュ状に平均0.25 cm 幅の溝を縦横10 cm 間隔に4本切った平板（エポキシ4）、溝を5 cm 間隔に8本切った平板（エポキシ8）、2.5 cm 間隔に溝を16本切った平板（エポキシ16）の4種類に加工し検討した。なお、靴底材料としては ASTM 準拠ゴムおよび革靴用の靴底革を用いた。2種類のエポキシ材料についての測定結果を図-5.4～図-5.7に示す。

動摩擦係数を見ると、図-5.5に示すように、エポキシ材料では溝を全く切っていないエポキシ0が非常に滑りやすい状況を示したが、溝の数が多くなるにつれて摩擦係数も大きくなる傾向を示した。しかし、エポキシモルタルでは、図-5.7に示すように、エポキシモルタル0と溝が多いエポキシモルタル16とでは、ほとんど同じ動摩擦係数を示し、エポキシモルタルでは溝の多少が摩擦係数に影響していない。また、靴底材料の違いによる摩擦係数の影響を見ると、ASTM ゴムのほうが革靴より大きな摩擦係数を示し、革靴のほうが滑りやすいことを示している。

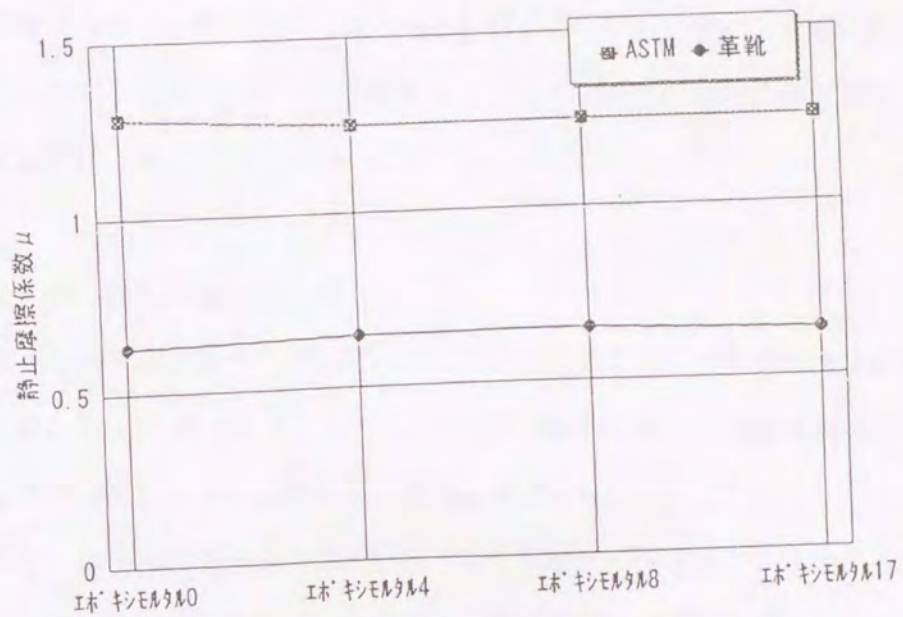
静止摩擦係数では、図-5.4に示す様に溝がないエポキシ0でも大きな摩擦係数を示したが、溝が多くなると摩擦係数が大きくなる傾向は動摩擦係数と同じである。エポキシモルタルでは、図-5.6に示す様に、動摩擦係数と同様で溝の数が増えても摩擦係数はほとんど変化していなかった。以上の結果を考察すると、エポキシ樹脂の様



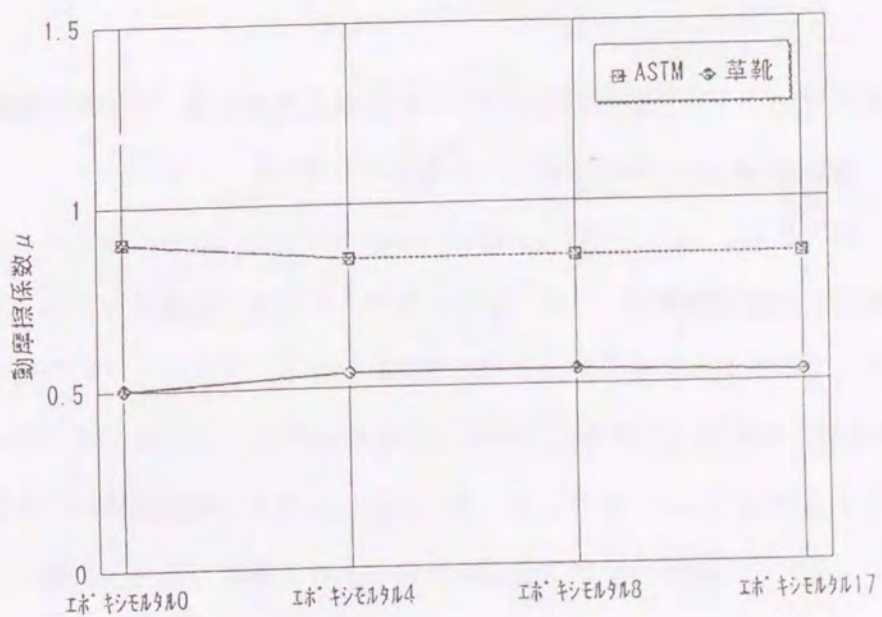
図一5・4 エポキシ平板の静摩擦係数測定結果



[図一5・5 エポキシ板の動摩擦係数測定結果



図—5・6 エボキシモルタルの静摩擦係数測定結果



図—5・7 エボキシモルタルの動摩擦係数測定結果

に表面が非常に平滑な材料では、摩擦係数は溝の数に影響され溝が増えると摩擦係数が上昇する傾向を示したが、エポキシモルタルのような表面が粗い材料では、表面の凹凸の影響が大きく、溝の多少はほとんど影響していない。また、靴底材料の影響を見ると、エポキシモルタルの全面を測定しておらず、凸部の摩擦係数だけを測定していることが原因と考えられる。

5. 2. 3 舗装材温度の影響

英国式ポータブルテスター（BPT）では得られた測定結果を路面の温度により補正することになっている。DF テスターS タイプ装置についても、舗装材温度が測定結果にどのように影響するかを検討することが必要である。

そのため、歩道用のアスファルト舗装として密粒度アスファルトコンクリートと開粒度アスファルトコンクリートの2種類の平板を作成し、試験温度を0～40℃までの範囲で10℃ずつ5段階に変化させて測定を行った。この時、湿潤状態にするために散布する水の温度は舗装材の温度に等しくするように調整し、また靴底ゴムとしてASTM 準拠ゴムと革靴の靴底革を用いた。これらの測定結果を図—5・8～図—5・11に示す。

この試験結果では、静止摩擦係数に多少のバラツキが見られたが、密粒度アスファルトコンクリートにおいては材料の締め固めに方向性があったり、開粒度アスファルトコンクリートにおいて表面が均一でない場合に、温度の変化による影響よりも舗装面のテクスチャーの影響が大きいと考えられる。また、動摩擦係数は、舗装表面上を回転しながら測定するので、平均的な摩擦係数を測定することになるが、密粒度アスファルトコンクリートではASTM 準拠ゴムを使った場合に、湿潤時と乾燥時ともに0℃と40℃の摩擦係数の間に0.08～0.09程度の差が生じた。しかし、この差はすべり抵抗の判定に影響を与えるほどの数値ではないと考えられる。

したがって、DF テスターS タイプでは温度差による摩擦係数の補正は必要がないと判断される。

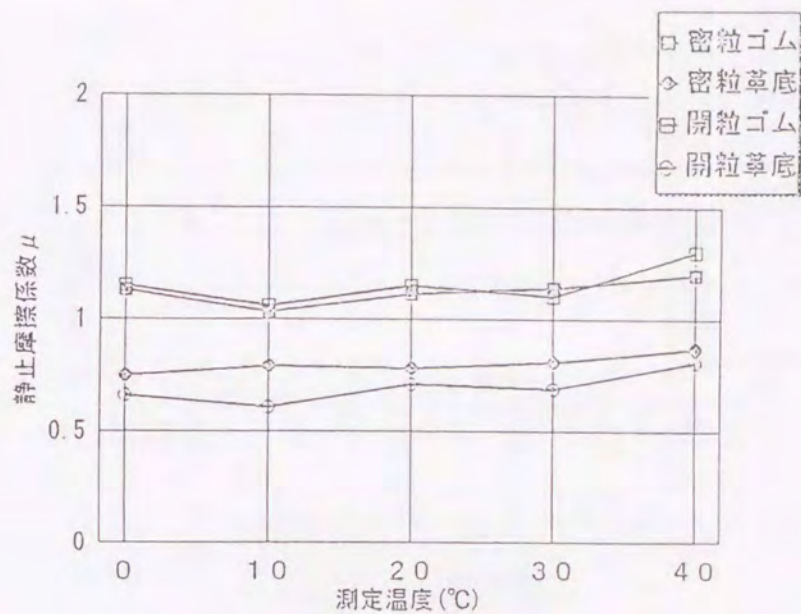


図-5. 8 湿潤時の温度による静止摩擦係数への影響測定結果

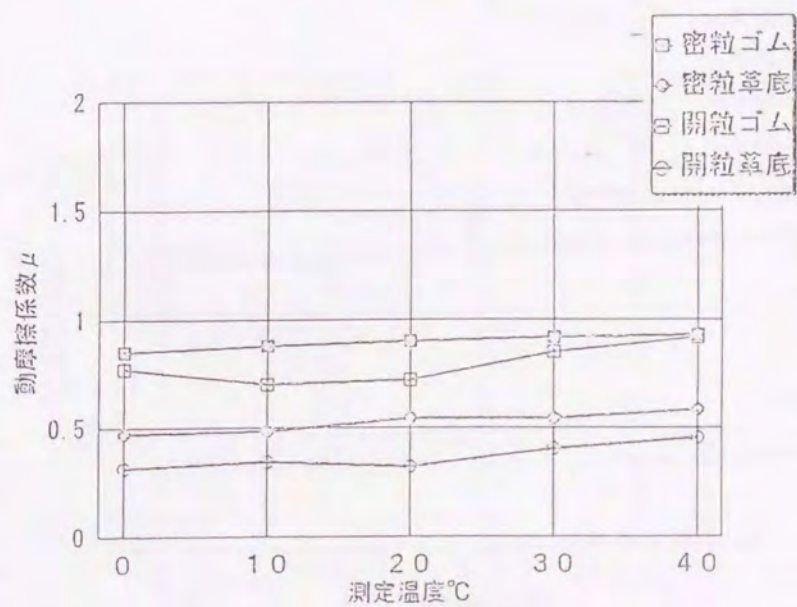


図-5. 9 湿潤時の温度による動摩擦係数への影響測定結果

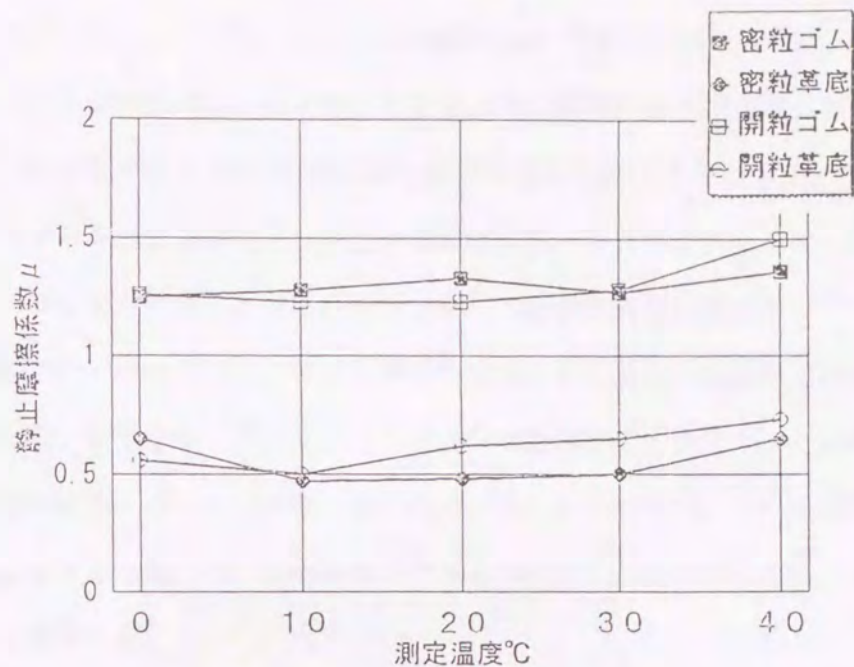


図-5. 10 乾燥時の温度による静止摩擦係数への影響測定結果

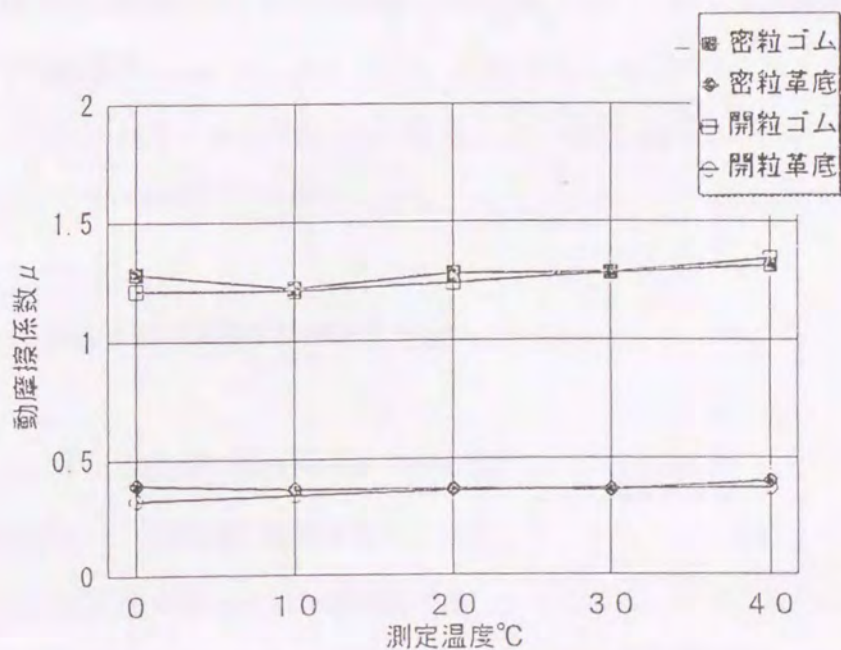


図-5・11 乾燥時の温度による動摩擦係数への影響測定結果

5. 2. 4 DF テスターS タイプの性能評価のまとめ

DF テスターS タイプについて、いくつかの項目について性能評価を行った。歩道のすべりに影響する摩擦係数は足が動き始めた直後の静止摩擦係数が関係すると言われているが、本測定装置では60 msec 後の静止摩擦係数を測定することができた。

また、アスファルト舗装要綱で使われている英国式ポータブルテスターは、舗装材に目地や溝があると測定できないとされているが、本測定装置では溝があっても摩擦係数を測定することが可能である。また、溝や目地は非常に平滑な舗装材では摩擦係数を大きくするのに役立つが、テクスチャーが粗い舗装材ではテクスチャーの影響が大きく、溝が摩擦係数にほとんど影響しないのが明らかにされた。このことは、すべり難い舗装材を作るためには、表面を加工するよりテクスチャーを変える方が効果的であることを意味する。

静止摩擦係数の値は動摩擦係数の値より大きくなると言われているが、本測定装置でも同様の結果が得られた。しかし、革靴のような靴底の硬い材質では靴底が変形せずに摩擦係数の差は少ない。

舗装材の温度差が摩擦係数に与える影響についても検討したが、温度差による影響は少なく、本測定装置においては温度補正などの措置は必要がないと考えられる。また、ゴムスライダーは測定毎に交換する必要はなく、測定状況に応じて著しい損傷が見られた時点で交換すればよいと考えられる。

5. 3 歩道舗装材の摩擦抵抗測定と評価

5. 3. 1 歩道舗装材の安全性評価の必要性

近年、都市部における歩道の舗装材として、タイル、レンガ、インターロッキング・ブロック (ILB)、石張平板など様々な材料が用いられている。これらは色彩が豊富であったり、様々な模様を創造することが容易であることから、都市の景観を向上させる目的で用いられている。しかしながら、歩道は歩行者のために設けられる施設であ

ることから、歩行者の安全性や快適性の観点からも設計、評価されなければならない。

それらを評価する視点は

- * 平坦性が良く
- * 雨の日でも水が溜まらなく、すべらなく
- * 歩行感が良く、長い時間歩いても疲れな

等があげられるが、その中でもすべる抵抗は直接事故や怪我などに結び付くことから安全性の評価において非常に重要なファクターとなる。

人に優しい歩道用舗装材料の選定方法の定義ははっきりしていないが、上記したような項目を歩道用舗装材の選定要因の一部として、出来るだけ物理的なデータを測定できる装置を使用して選定法を考慮していくべきである。平成5年度の「アスファルト舗装要綱」に歩道舗装材のすべり抵抗値が示されたことは、舗装材の表面の持つべき性能の一部を評価したとはいえるが、一歩前進であり非常に有意義なことである。その舗装要綱で示している良好な物理性状測定値の範囲を表-5.1に示す。

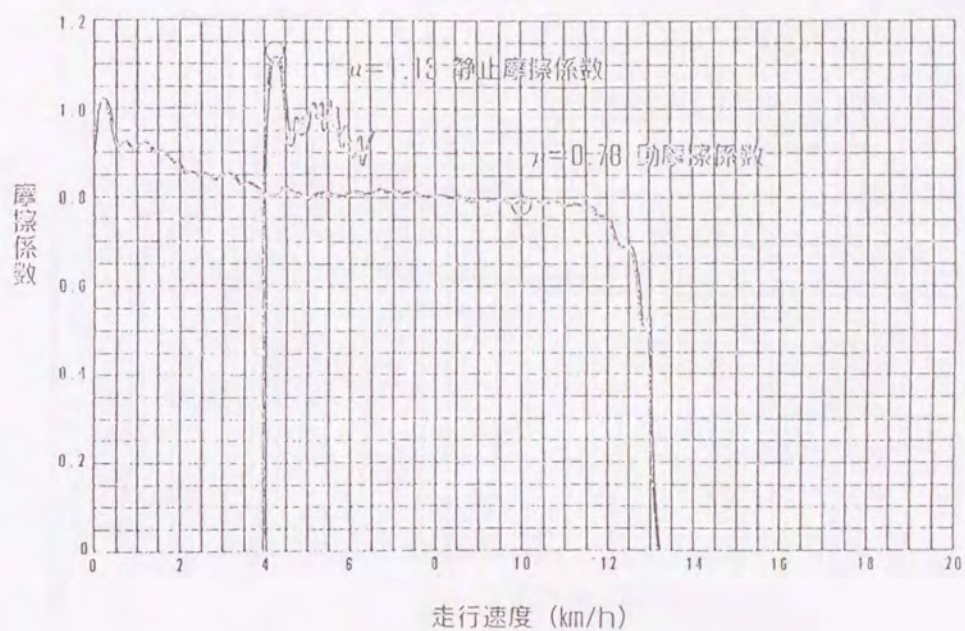
表-5.1 良好な物理性状測定値の範囲⁴⁾

測定装置	測定値	良好な範囲
JIS A 6519 床の堅さ試験	最大加速度(m/s^2)	~185
DFテスター Sタイプ	湿潤路面の静止摩擦係数	0.37~
面の平坦性測定装置	路面の凹凸の標準偏差(mm)	0.66~1.96

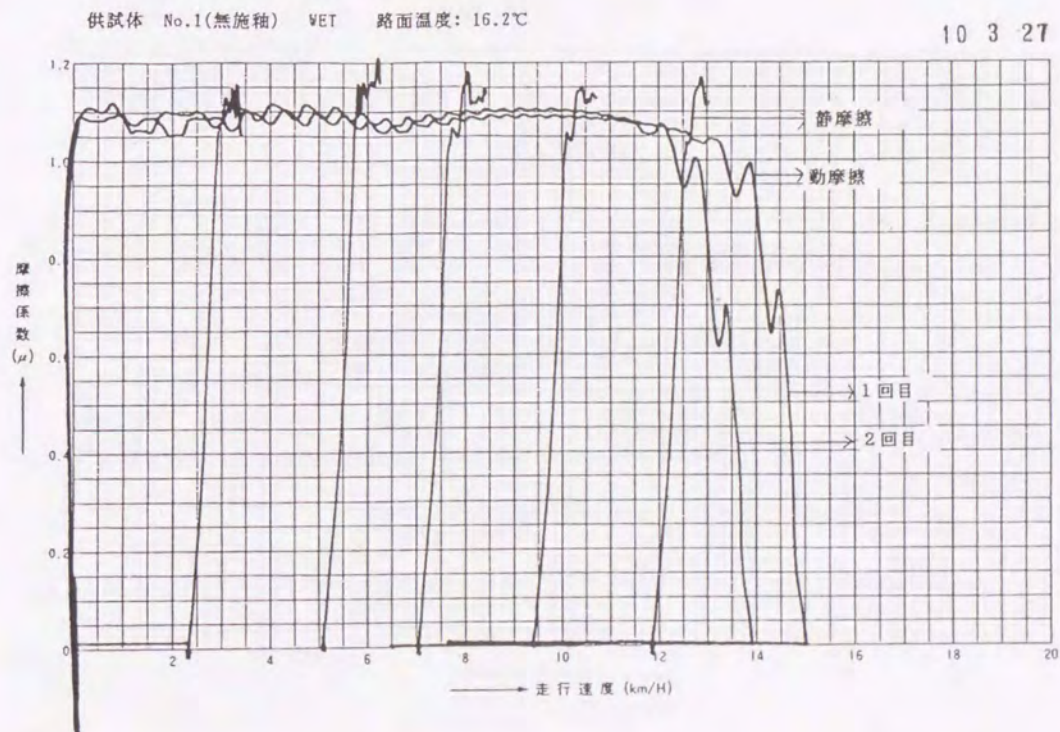
このように、人にやさしい路面であるための重要なファクターであるすべり抵抗値を測定し、評価することの重要が認識されてきているが、これまでにその測定を容易に行える実用的な装置が開発されていなかった。

そこで、本研究では実際の現場で簡単にしかもできるだけ正確に、個人差がないようにしかも、短時間ですべり抵抗を測定できるようなDFテスターSタイプを開発し、その性能評価を行ってきた。ここでは、この装置を用いて実際の歩道路面について摩擦抵抗を測定し、歩道路面の摩擦係数の評価を行うものである。

歩道用舗装路面の測定に先立ち、歩道舗装用のタイルについて予備実験した。摩擦係数の標準的な測定結果を図-5.12に示す。また、タイルの表面処理の程度で



図一5. 12 歩道舗装用タイルの標準的なすべり抵抗測定記録



図一5. 13 歩道舗装用タイルのすべり抵抗測定例（無施釉、湿潤）

供試体 No.2(50%施釉) WET 路面温度: 16.2℃

3 27

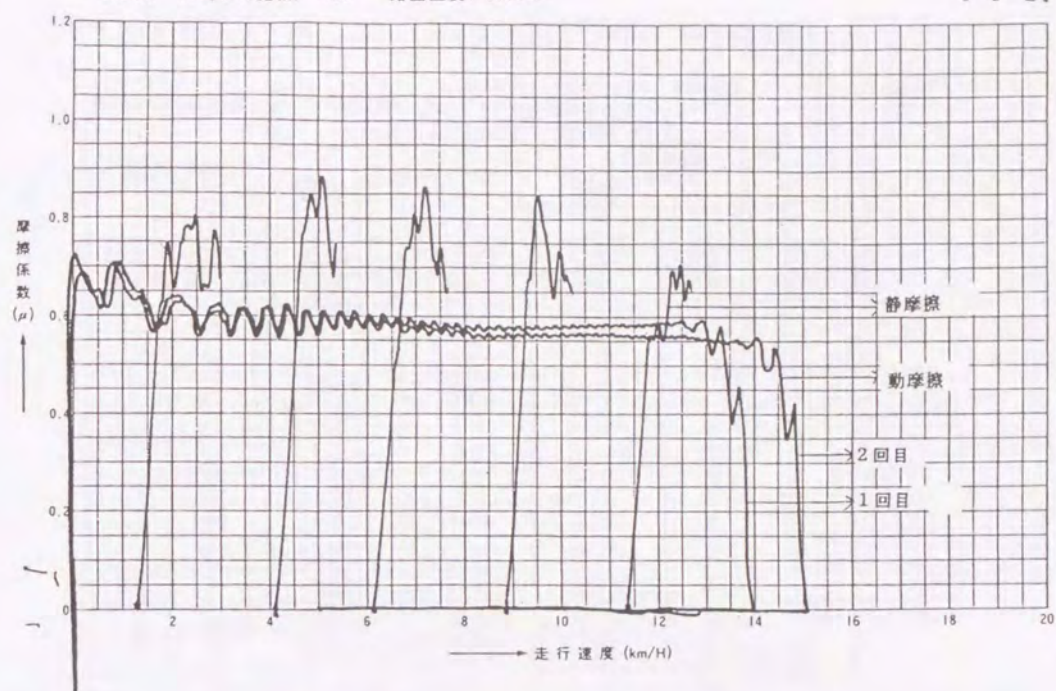


図-5. 14 歩道舗装用タイルのすべり抵抗測定例 (50%施釉、湿潤)

供試体 No.3(80%施釉) WET 路面温度: 16.8℃

10 3 27



図-5. 15 歩道舗装用タイルのすべり抵抗測定例 (80%施釉、湿潤)

表一5・2 インターロッキングブロックの測定例

1999. 3. 2(火)調査

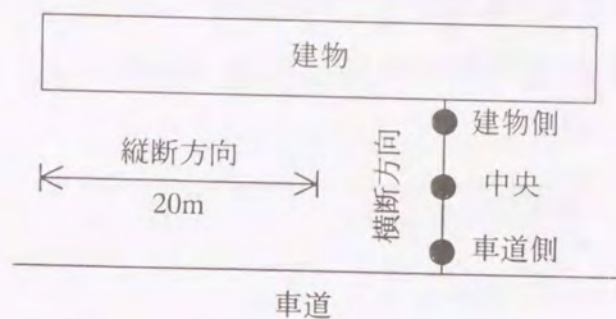
舗装内容	すべり測定値				
	静摩擦	動摩擦			平均
		速度			
		6	8	10	
グレーピング	0.921	0.525	0.52	0.52	0.52
グレーピング	0.913	0.64	0.6	0.58	0.6
I L B	0.829	0.55	0.51	0.51	0.52
I L B	0.931	0.8	0.8	0.78	0.79
I L B	1.02	0.85	0.825	0.8	0.8
I L B	1.22	0.9	0.82	0.82	0.84
I L B	0.979	0.9	0.825	0.82	0.84
I L B	0.942	0.8	0.77	0.76	0.77
I L B	0.92	0.74	0.75	0.77	0.75
I L B	0.912	0.76	0.75	0.75	0.75
I L B	0.886	0.725	0.725	0.725	0.725
I L B	0.938	0.8	0.79	0.8	0.8
I L B	0.917	0.74	0.725	0.725	0.74

測定値がどのように変化するかを図一5・13～図一5・15に測定記録を示す。図中には静止摩擦係数と2回の動摩擦係数の測定結果を示している。静止摩擦係数は路面の状態によって変化が見られるが、動摩擦係数は2回の測定結果は非常に良く一致しており、再現性が高いことを示している。また、表一5・2はインターロッキングブロックの静止摩擦係数と動摩擦係数の測定例を示す。

5. 3. 2 札幌市中心部における歩道のすべり抵抗の測定

本研究では札幌市中心部において供用されている歩道の中から、材質、模様が異なる歩道を37工区選定し、DFテスターSタイプおよび英国式ポータブルテスターによってすべり抵抗を測定した。

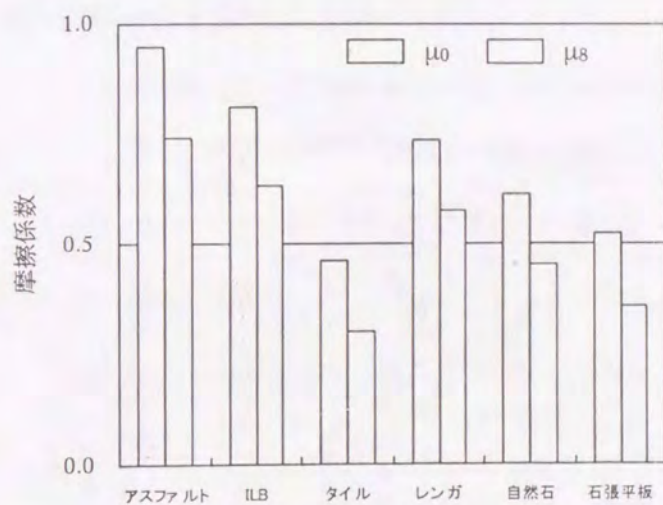
測定した37工区の内訳はタイル26工区、アスファルト3工区、レンガ4工区、石張平板2工区、自然石1工区、インターロッキングブロック(ILB)1工区である。各工区では図一5・16に示すような横方向の3地点の静止摩擦係数(μ_0)および4 km/hと8 km/hにおける動摩擦係数(μ_4 、 μ_8)をDFテスターSタイプで測定するとともに、英国式ポータブルテスターでBPNを測定した。また、タイル、アスファルト、石張平板、ILB歩道におけるすべり抵抗の縦方向変化を測定した。



図—5・16 歩道路面の測定位置

5. 3. 3 歩道の材質とすべり抵抗の関係

最初に、歩道の材質とすべり抵抗の関係について、中央部における舗装材料ごとの μ_0 と μ_8 を図—5・17 に示す。タイル、石張平板の歩道の摩擦係数はアスファルト舗装の約40%～50%であり、かなりすべり易いといえる。



図—5・17 舗装材料ごとの摩擦係数の比較

次に、歩行者の少ない車道側部と歩行者の多い中央部における静止摩擦係数 μ_0 と動摩擦係数 μ_4 の差を図—5・18 に示す。石張平板、ILB 舗装では車道側部と比べ中央

部のすべり抵抗が小さくなるが、タイル舗装では測定位置による違いはほとんど見られない。このことから、石張平板、ILB は歩行者による磨耗を受けやすいといえる。

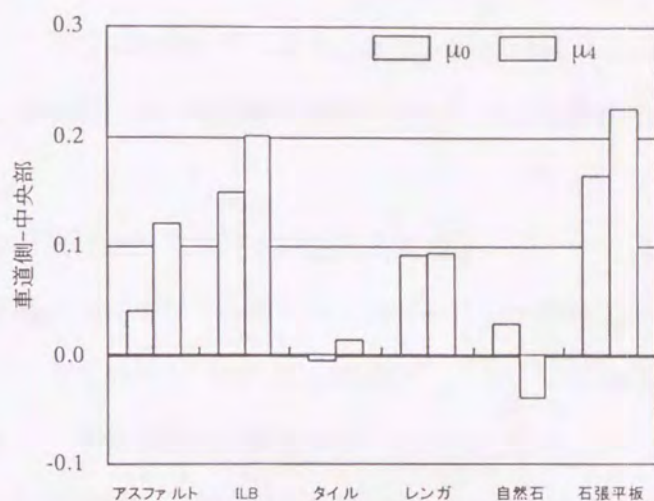


図-5. 18 車道側部と中央部の摩擦係数の比較

5. 3. 4 静止摩擦係数と BPN の関係

タイル、アスファルト、ILB、レンガの歩道中央部における静止摩擦係数 μ と BPN の関係を図-5・19に示す。両者の相関係数は0.88であり、高い相関を示して

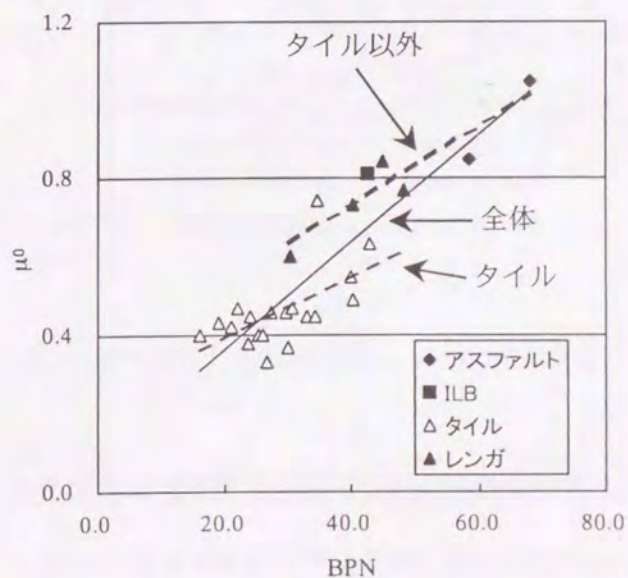


図-5・19 静止摩擦係数 (μ) と BPN の関係

いる。しかしながら、タイル以外の歩道の静止摩擦係数と BPN の関係は 0.93 であるのに対し、タイルの相関係数は 0.60 となった。特に、BPN が 40 以下のタイルでは BPN が変動しても静止摩擦係数の大きな差は見られない。また、タイルは全体の回帰直線よりも下方に位置していることから、回帰直線を用いて BPN から静止摩擦係数を推定する場合、静止摩擦係数を過大評価する可能性がある。

5. 3. 5 歩行者の進行方向にすべり抵抗の変動

タイル、石張平板歩道はデザイン性を高めるために同一試験工区においても様々な模様や材質が用いられている。このような歩道において、1 m 間隔で DF テスター S タイプで測定を行い、すべり抵抗の縦断方向（歩行者の進行方向）変動を検討した。アスファルト、ILB、タイル、石張平板歩道における動摩擦係数 μ_4 の変動傾向を図 5・20 に示す。

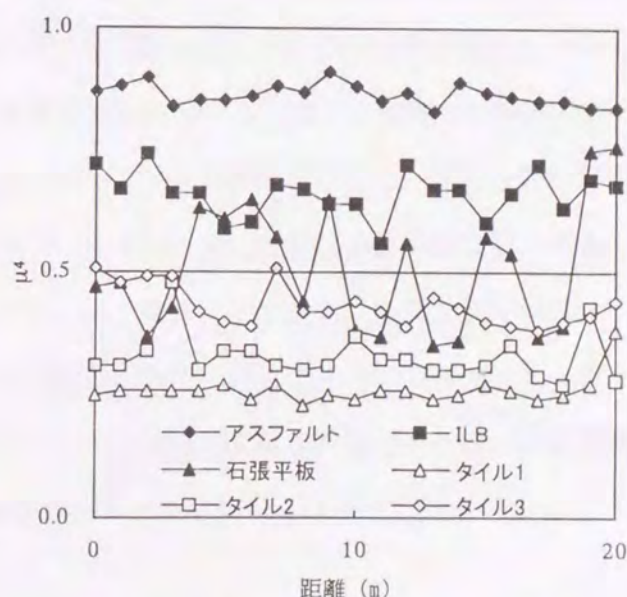


図 5・20 動摩擦係数 μ_4 の縦断方向変化

アスファルト、ILB は動摩擦係数 μ が高く、縦断方向の変動も小さい。しかしながら、タイル 2 と 3、および石張平板は摩擦係数が小さいことに加えて、景観のために設けられたパターンや材質の変化に応じて摩擦係数が大きく変動する。同じ歩道内に

すべり易い個所とすべり難い個所が混在していることは歩行者に大きな負担を強いることから、歩道の安全性を評価するには単にすべり抵抗だけでなく、歩行者の進行方向（縦断方向）におけるすべり抵抗の変動を考慮に入れる必要がある。

5. 3. 6 歩道舗装材等の安全性評価基準

これまでの結果でから、歩道舗装材等のすべり抵抗性を評価できることが分かったが、安全なすべり抵抗基準としてどの程度の摩擦係数が必要であるか、すなわち安全性評価基準を確立することが課題として挙げられる。

Kuschhefski によると、「すべりに対する安全性を判断する基準としての摩擦係数は、異なる試験機を組合せて摩擦の測定実験を行い、踵、靴底全体、爪先の3点ですべり始めた直後の静止摩擦係数と、すべり速度 0.25 m/s （約 1 km/h ）の動摩擦係数を計測し、これを平均して基準にするとよい」として、具体的な基準値を示していないが、歩道等のすべり基準を決めるときの指標を示唆している。また、James Miller の論文²⁾は摩擦係数 $\mu = 0.5$ を安全な舗装材の摩擦係数としているし、R. Brrungraber⁹⁾が調査したすべりの論文を見ると、安全な静止摩擦係数は $\mu = 0.6 \sim 0.7$ とする見解や、 $\mu \geq 0.5$ を安全な値とする報告、あるいは $\mu = 0.4$ が安全と不安全の境とするという報告などがあり、確立されていない。

しかし、これらの報告とDFテスターSタイプの特徴である静止摩擦係数と動摩擦係数の両方を測定した多くの舗装材の結果を基にすれば、静止摩擦係数が $\mu = 0.5$ 以上あれば、歩道舗装材のすべりに関してはほぼ安全であると言えると考えられる。

5. 3. 7 歩道路面のすべり抵抗測定の評価に関する他の研究例

これら著者らの研究のほかに、歩道舗装路面のすべり抵抗をDFテスターSタイプを用いて行い、装置の評価を行ったいくつかの論文がある。それらの結果をここで紹介する。

(1) 東京農業大学牧研究室での研究⁵⁾

東京農業大学の牧教授と竹内助手は「歩行者系道路舗装材の快適性に関する検討」の中で、表5. 3に示す試験材料について路面の凹凸試験とすべり試験を行って舗装材の評価を試みている。

表5. 3 試験に用いた舗装材の緒元 (単位: mm)

舗装材の種類	寸 法	略 号
密粒度アスファルト舗装	—	As
コンクリート平板	290×290	Co
インターロッキングブロック	220×105	ILB
擬 石 平 板	300×300	擬 石
樹脂系舗装(ニート工法)	—	樹 脂
小 舗 石	50×50	舗 石

すべり試験は英国式ポータブルテスター (BPST) と DF テスターS タイプ (SDFT と呼んでいる) で行った。BPST によるすべり抵抗測定結果を図5. 21に、SDF テスタによる静止摩擦係数と動摩擦係数の測定結果を図5. 22に示す。

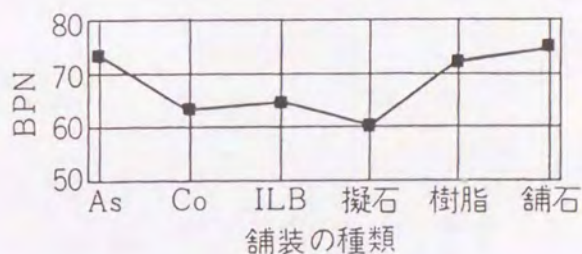


図5. 21 BPST によるすべり抵抗測定試験結果

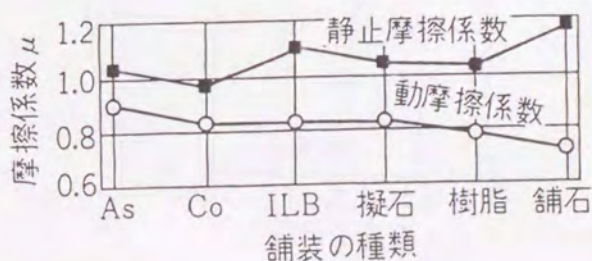


図5. 22 SDFT によるすべり抵抗試験結果

また、車椅子を用いた線的な凹凸測定の前波数値とSDFTの動摩擦係数との間には、図5. 23に示すような相関が認められ、運動靴における官能試験結果と動摩擦係数とも図5. 24に示すように相関があり、歩道のすべり抵抗測定法に適している。しかし、BPSTはいずれの試験結果とも相関がなく、目地を含んだ面や斜面での測定ができないなど、試験機の構造上、歩道のすべり抵抗測定法としては適していないという結論を示した。

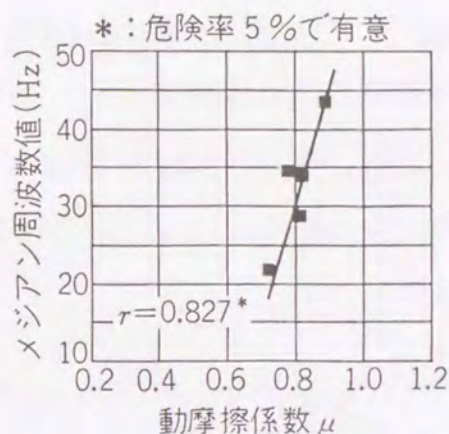


図5. 23 線の凹凸試験とSDFTすべり抵抗試験の関係

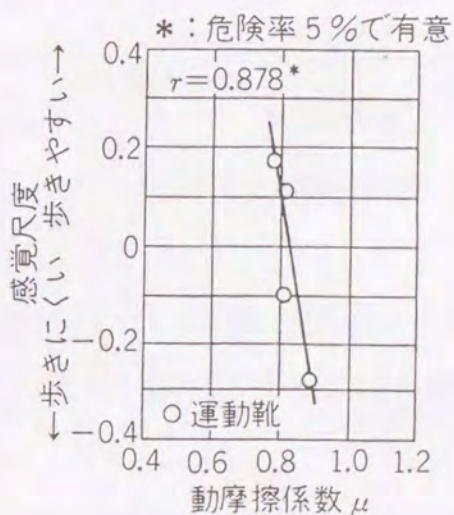


図5. 24 官能試験とSDFTすべり抵抗試験の関係

(2) 建設省土木研究所における研究

建設省土木研究所では舗装研究室を中心として歩行者系舗装の歩きやすさや舗装材料の評価と試験法に関する研究を行っている。

その1つである池田拓也舗装室長らの「歩行者系舗装の歩きやすさの評価手法に関する研究」^{6) 7)}では、土木研究所構内に施工さいた歩行者系道路試験舗装工区においてアンケート調査と物理性状測定を行い、その結果を用いて歩行者系舗装の歩きやすさに関する評価方法を検討している。総合評価に用いている物理性状は舗装の硬さ、すべり抵抗性と平坦性であり、すべり抵抗性の測定にはBPFT、DF テスター、SFDTを用いており、アンケート調査結果と高い相関係数を示したすべり抵抗性はSFDTによる静止摩擦係数であるとされており、歩きやすさと静止摩擦係数の関係を図5. 25のように示している。

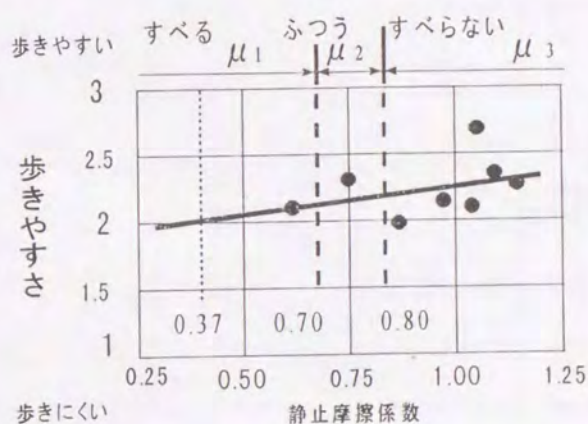


図5. 25 SFDTによるすべり抵抗測定結果と歩きやすさの関係

また、歩きやすさと、硬さ、すべり抵抗性、平坦性の3つの変数を用いた総合評価式を判別分析により開発し、すべり抵抗性の変数ではSFDTによる静止摩擦係数を用いた次式を提案している。

$$y = -0.0242\alpha + 2.4585\mu + 0.7062\sigma - 0.1144$$

(5. 1)

ここで、 y = 歩きやすさの判別得点

α = 硬さの測定値 (最大加速度、 m/s^2)

μ = すべり抵抗性の測定値 (湿潤路面の静止摩擦係数)

σ = 平坦性の測定値 (路面の凹凸の標準偏差、mm)

また、同研究所材料施工部化学研究室の佐々木巖研究員らは「歩行者に優しい舗装材料の評価と試験方法」⁸⁾の論文で、路面すべりの試験の要件としては、その舗装で多く用いられる靴底材料により動摩擦係数を測定することが重要であるとし、歩行者系舗装表層材料のすべり抵抗性試験方法の検討結果として表5. 4を示している。

表5. 4 歩行者系舗装表層材料のすべり抵抗性試験方法の検討結果

		A	B	C
名称		振り式スキッドレジスタンステスター (BPN テスター)	DF テスター S タイプ (SD フリクションテスター)	斜め引張型すべり試験器
指標の妥当性	適用規格	舗装試験法便覧 ASTM-303	無し	日本塗布工業会
	機械面の有無	有	有	有
	計測物理量	摩擦抵抗	摩擦係数	引張り強度
	精度	1BPN	0.01	0.1
	評価値	BPN	摩擦係数 μ	$C.S.R = \frac{P_{max}}{78.5}$
	測定方法	振子の先にゴム製スライダーを付け、スライダーが試験面の一定距離を滑動する時の抵抗値 (BPN) を測定する	回転円盤にゴムピースを付け、ゴムピースを試験面に接触させて円盤を回転させゴムピースに作用する摩擦力を計測し、摩擦係数として記録する。	所定形状のすべり台座にゴム製のすべり版を取り付け、鉛直荷重を載荷させながらすべり版を試験面に接触させた瞬間に、一定の荷重速度で18度の斜め上方へ引張った時の最大荷重を測定する。
試験機の汎用性	概算購入費	100 万程度	360 万程度	不明
	採用機関の有無	日本道路協会	無	日本塗布工業会
	試験機の流通	購入容易	購入容易	購入困難
	重量	30kg	42.6(25.6+17)kg	約100kg
	準備	やや困難 30 分	やや困難 30 分	困難
	測定時間	5 分	10 分	不明
	測定要員	2 人	2 人	不明
	熟練度	必要	必要	必要
	移動性	比較的容易 人力可	やや困難	困難
測定頻度		3カ所/工区 1ヶ所 5回	3カ所/工区 1ヶ所 3回	3カ所/工区 1ヶ所 5回
測定上の条件		湿潤面は散水毎測定 目地間隔 15cm 以上	湿潤面は散水毎測定 目地がある場合は測定数を増やす	湿潤面は散水毎測定 目地間隔 30cm 以上
特徴		・一般化している (歩道における指標として BPN40 以上) ・現場で人か持ち運びして比較的容易に測定可 ・摩擦係数と BPN の相関性に若干劣る	・各種の靴底のゴムにて測定できる ・静摩擦からの人の歩く速度の動摩擦が測定できる ・速度を変化させながら連続測定同時に記録	・歩行時の摩擦係数をゴムの種類に合わせて測定できる ・測定器が複雑
備考		表面状況を報告 (乾燥面、湿潤面)	表面状況を報告 (乾燥面、湿潤面)	表面状況を報告 (乾燥面、湿潤面)
総合評価		○	○	△

5. 4 本章のまとめ

本章では、第2章で述べた歩道舗装など歩行者に優しい歩行空間を創出するために必要となる安全性の評価を目的にして開発したDFテスターSタイプの性能評価をすることと、それを利用した歩道舗装材のすべり抵抗測定による評価を試みた。

最初に、DFテスターSタイプについて、いくつかの項目について性能評価を行った。歩道のすべりに影響する摩擦係数は足が動き始めた直後の静止摩擦係数が関係すると言われているので、本装置は60 msec 語の静止摩擦係数が測定することが可能であることが示された。また、舗装材の目地や溝がすべり抵抗測定に及ぼす影響についても検討し、非常に平滑な舗装材ではそれらが摩擦係数を大きくするのに役立つが、テクスチャーが粗い舗装材ではテクスチャーの影響が大きくことが示された。このことは溝が摩擦係数にほとんど影響しないことを意味し、すべり難い舗装材は表面を加工するより、テクスチャーを変える方が効果的であることを示すものである。

舗装材の温度差が摩擦係数に与える影響は少なく、本装置においては温度補正などの措置は必要がない。また、ゴムスライダーは損傷が見られる時点で交換すればよい。

一方、実際の施工されている各種の歩道舗装材についてDFテスターSタイプを用いて測定を行い、静止摩擦係数と動摩擦係数、および英国式ポータブルテスターの測定値と比較し、いくつかの興味ある結果を得た。それらを簡単にまとめると、

- ・ 歩道のすべり抵抗は材質によって大きく異なる。特に、タイル舗装はアスファルト舗装に比べてすべり抵抗が著しく低い。
- ・ 同じ材質の歩道であっても歩行者が多い歩道中央部はすべり抵抗が小さくなる傾向にある。
- ・ タイル舗装におけるBPNと静止摩擦係数の相関は低い、タイル以外の舗装では両者の相関が高い。
- ・ タイル、石張平板舗装はアスファルト、ILB舗装に比べて縦断方向（歩行者の

進行方向)におけるすべり抵抗の変動が大きい。

などである。

このように、DFテスターSタイプは歩道舗装等のすべり抵抗を測定する新しい装置として、その性能は十分に評価することができ、ポータブルで簡単に操作ができることからその実用性が実証されたといえる。今後は、より多くの測定結果を積み重ねて、この装置の測定値を用いた歩道舗装材等の安全性評価基準を確立する必要がある。

参考文献

- 1) Schuster : 「Slip—An Investigation of Safe Walkway Prevention」 1966, 12
- 2) James M. Miller : 「A Bibliography of Coefficient of Friction Literature Relating to Slip Type Accidents」 Center For Ergonomic and Safety Department of Industrial and Operations Engineering , 1983
- 3) 恒雄、竹内 康、小梁川雅、安部裕也 : 歩道舗装材の摩擦係数測定試験機に関する研究、舗装工学論文集 第2巻、土木学会、pp.197-204、1997.
- 4) 日本道路協会 : アスファルト舗装要綱、平成5年
- 4) 小森谷一志、池田拓哉、谷口聡 : 歩行者系舗装の歩きやすさの評価、土木技術資料、Vol.39、No.11、(財)土木技術センター、pp.44-49、1997
- 5) 牧 恒雄、竹内 康 : 歩行者系道路舗装材の快適性に関する検討、舗装、第30巻第6号、pp.16-20、1995.
- 6) 小森谷一志・池田拓也・谷口 聡 : 歩行者系舗装の歩きやすさの評価、土木技術資料、Vol.39、No.11、pp.44-49、1997
- 7) 小森谷一志、池田拓哉、谷口聡 : 歩行者系舗装の歩きやすさの評価手法に関する研究、舗装工学論文集 第2巻、土木学会、pp.181-188、1997.
- 8) 佐々木巖・坂本浩行 : 歩行者に優しい舗装材料の評価と試験方法、土木技術資料、Vol.41、No.3、pp.20-25、1999.
- 9) Roberet J. Brungraber : 「An Overview Floor Slip—Resistance Research With Annotated Bibliography」 National Bureau of Standards, 1976 Jan.
- 10) Johon Templer : 「GROUND AND FLOOR SURFACE TREATMENTS」 U. S. Architectural and Transportation Barriers Compliance Board, 1983 March.
- 11) DFテスター (Sタイプ) 技術資料、日邦産業株式会社
- 12) Barrett : 「Ovservation on the Coefficient of Friction of Shoe Soling Materials」 Rubber Journal Dec. 1966

第6章 結 論

湿潤路面の上のタイヤと路面のすべり抵抗測定とすべり抵抗の改善は、道路走行の安全性を向上するために、道路設計および道路管理する上で極めて重要である。このすべり抵抗を測定する方法は大きく、車輪ロック方式、スリップ率方式および横すべり（サイドフォース）方式の3つに分けられ、各種の測定装置が世界各国で使用されている。しかし、それぞれの測定方法および測定装置にはいくつかの課題がある。

全体として共通している課題は測定装置（測定車）が大型車牽引式等の実物大であり、初期費用と維持管理費用が高いことである。このため、より簡単なポータブル化した性能の良いすべり抵抗測定装置を開発することである。

路面のすべり抵抗は車両の走行速度により変化する速度依存性がある。この速度依存性は路面のテクスチャーによる排水能力が密接に関係してくる。したがって、すべり抵抗を測定する場合には、速度の変化によるすべり抵抗の変化を同時に測定できることが望ましいが、世界的に実用的な装置がないのが現状であり、新しい装置の開発が求められている。

路面のすべり抵抗やテクスチャーを測定する方法や装置は国によって異なっていることである。このため、各国で測定された値を直接比較することが困難であり、異なる装置の相互関係を明らかにするとともに、測定値を共通の尺度に変換するグローバルスタンダードの開発が求められている。

さらに、最近における高齢化の進展や人に優しい安全で歩き安い歩道を実現するために、歩道舗装材や建築物の床材などのすべり抵抗を測定することが必要となってきたが、現場で簡単に歩行速度で静止摩擦係数や動摩擦係数を測定する装置の開発が求められてきている。

本研究では、これら4つの課題に対応した新しいポータブルなすべり抵抗測定装置の開発とその利用に関する研究をまとめたものである。

6.1 本研究で得られた結論

本研究で得られた結論を簡単にまとめると次のようになる。

第1章は総論であり、すべり抵抗測定に関する基本事項、すべり抵抗に関する既往の研究や現状の課題、研究の目的などについてまとめている。

第2章では、従来のすべり抵抗測定装置のもつ欠点を克服すべく新しく開発したポータブルすべり抵抗装置の開発目的、構造と性能について述べ、PIARCの国際共同実験などに参加してこの装置の性能が評価され、アメリカの材料試験協会(ASTM)のスタンダードとして規格化された経緯について示した。

現在、世界的に実用化されている英国式振り子テスターは路面とゴムスライダーの接触面の微妙な調整が測定値に影響することから、測定者により個人差があり、また低速領域におけるすべり抵抗しか評価できないといういくつかの問題点を有している。そこで、これらの問題点を解決する動的すべり測定装置、DFテスター(Dynamic Friction Tester)を開発した。開発した装置はポータブルなすべり抵抗装置で、小型で持ち運びが容易であり、操作が非常に簡単で測定者の個人差がなく、測定時間も非常に短いものである。この装置の測定原理は従来の振り子式に対して、円形に回転する円板にゴムスライダーを取り付けるという世界で初めての測定方法を用いていることおよび1回の測定ですべり抵抗の速度依存性を評価できることが極めてユニークな特徴である。このDFテスターの速度依存性測定の統計的評価、わだち(凹凸路面)における影響評価を行い、その性能を確認している。

さらに、1992年9月と10月の2ヵ月間ベルギーとスペインでの国際共同実験に参加した実績を背景に、1998年にアメリカASTMの標準規格に採用され、E-1911-98の番号(スタンダードナンバー)を取得した経緯を示している。

また、人が歩く場合は動摩擦だけでなく、静摩擦も考慮する必要があることから、この両方を一つの装置で測定でき、しかも簡便に測定できる装置を目的として、実験室および現場で使用可能な測定装置の開発を試みたDFテスターSタイプの構造につ

いても示した。DF テスター S タイプでは静止摩擦係数を人の体重が舗装面にかかる
ときの接地圧で測定し、動摩擦係数は人の足が歩道表面を動く速度を考慮して測定速
度を決めている。

第 3 章では、新たに開発された DF テスターは 1992 年に P I A R C が開催した
国際共同実験に参加し、ベルギーとスペインにおける 56 箇所の道路試験個所で他に
世界各国から参加した 37 種類のすべり抵抗測定装置とともに測定を実施し、この実
験で得られたデータベースを使用して、測定原理やタイプが異なる装置によるすべり
抵抗測定値と DF テスターによる測定値を比較し、現在、世界各国で使用されている
装置間の関係を示す回帰直線と相関関係を把握した。この結果、DF テスターは A S T
M トレーラを始めとする車輪ロック方式の装置と高い相関が見られたが、全体的にか
なり高い相関関係にあることが示された。

一方、この国際共同実験の最大の成果は、異なる方法や装置による異なる速度にお
けるすべり抵抗測定値を共通の値に変換する国際摩擦指標 (IFI) を開発したことである。
本章では、さらに DF テスターと I F I の関係を解析し、DF テスターとテクスチャ
ーデータを用いて I F I を算出する関係式を求めた。

これらの結果から、DF テスターは A S T M 規格に基づく装置であるとともに、す
べり抵抗測定値のグローバルスタンダード (I F I) を算出できる有用なポータブル
テスターであることが実証された。

第 4 章では、これまで研究を行ってきた舗装路面のすべり抵抗とテクスチャーの関
係について、P I A R C の国際共同実験及びデータ解析に参加した経験をもとにして、
新しく開発したテクスチャー測定装置 (C T メーター) について、米国 N A S A
(Wallops) の滑走路面における測定実験のデータを解析した結果を示している。

C T メーター (Circular Texture Meter) は DF テスターですべり抵抗を測定する路
面の軌跡と同じ円周上のマクロテクスチャーを CCD レーザ変位センサーで非接触に
より測定する装置であり、非常に短時間で容易に路面の平均プロファイル (MPD) を
測定できるものである。

NASAのデータセットを用いて解析した結果は、従来の簡易にテクスチャーを測定するサンドパッチ法によるテクスチャー測定値とほぼ一致する高い相関が得られた。この結果から、第3章で述べた国際摩擦指標(F60、Sp)のうち、テクスチャー測定値から求められるすべり抵抗の速度依存性を表すSpをCTメータの測定値から算出することが可能であることが示された。この結果、DFテストのすべり測定値とCTメータの測定値を組み合わせ、世界の任意の場所における路面のIFIを求める方法を確立することの可能性が示されたことになる。

第5章では、歩道舗装等の安全性の評価を目的にして開発したDFテストSタイプの性能評価をすることと、それを利用した歩道舗装材のすべり抵抗測定による評価を試みた。最初に、DFテストSタイプについて、いくつかの項目について性能評価を行った。歩道のすべりに影響する摩擦係数は足が動き始めた直後の静止摩擦係数が関係すると言われているので、本装置は60msec後の静止摩擦係数が測定することが可能であることが示された。また、舗装材の目地や溝がすべり抵抗測定に及ぼす影響についても検討し、非常に平滑な舗装材ではそれらが摩擦係数を大きくするのに役立つが、テクスチャーが粗い舗装材ではテクスチャーの影響が大きいことが示された。

このことは溝が摩擦係数にほとんど影響しないことを意味し、すべり難い舗装材は表面を加工するより、テクスチャーを変える方が効果的であることを示すものである。

舗装材の温度差が摩擦係数に与える影響は少なく、本装置においては温度補正などの措置は必要がない。また、ゴムスライダーは損傷が見られる時点で交換すればよい。

一方、実際の施工されている各種の歩道舗装材についてDFテストSタイプを用いて測定を行い、静止摩擦係数と動摩擦係数、および英国式ポータブルテストの測定値と比較し、いくつかの興味ある結果を得た。それらを簡単にまとめると、

- ・歩道のすべり抵抗は材質によって大きく異なる。特に、タイル舗装はアスファルト舗装に比べてすべり抵抗が著しく低い。
- ・同じ材質の歩道であっても歩行者が多い歩道中央部はすべり抵抗が小さくなる傾向にある。

- ・タイル舗装におけるBPNと静止摩擦係数の相関は低い、タイル以外の舗装では両者の相関が高い。
- ・タイル、石張平板舗装はアスファルト、ILB舗装に比べて縦断方向（歩行者の進行方向）におけるすべり抵抗の変動が大きい。

などである。このように、DFテスターSタイプは歩道舗装等のすべり抵抗を測定する新しい装置として、その性能は十分に評価することができ、ポータブルで簡単に操作ができることからその実用性が実証されたといえる。

6・2 今後の研究課題

今後は、新しく開発されたDFテスター、DFテスターSタイプ、CTメーターを使用してより多くの測定結果を積み重ねて、この各装置の測定値を用いた舗装や歩道舗装材等の安全性を確立することが基本的な課題である。

特に、DFテスターSタイプは実際の歩道舗装での測定実績がまだ少ないことから、今後はより多くの測定例を重ね、かつその測定結果と実際の歩行者の感覚を調査することにより、歩行者側に立った安全基準の確立が重要であると考えられる。

一方、CTメータについては現在世界で仕様されているいくつかのテクスチャー測定装置とあわせて多くの実験を重ねており、これらのデータを解析することによりCTメータの有用性を検証することと、最終的にはDFテスターと同様にASTM規格の認証を得ることを目指すことである。

謝 辞

この論文を完成するにあたり、最初から最後までご指導頂きました室蘭工業大学建設システム工学科斉藤和夫教授に対して、心から感謝いたします。そして、本論文の研究内容について懇切丁寧にご指導頂いた室蘭工業大学建設システム工学科近藤俊郎教授、田村亨助教授、情報工学科佐藤一彦教授、北海道工業大学土木工学科笠原篤教授に深く感謝いたします。

（財）土木研究センター顧問市原薫博士、東京農業大学牧恒雄教授、北海道工業大学土木工学科亀山修一助教授、金亀建設株式会社専務取締役西山周氏、それに故池田拓哉氏（元建設省土木研究所舗装研究室長）には資料を提供して頂くなどして並々ならぬご指導をいただき深く感謝いたします。

本研究を始めるきっかけを頂いた日本道路公団副総裁藤井治芳氏、長岡技術科学大学講師山之口浩博士（元日本舗道株式会社技術研究所長）とサニー工研有限会社代表取締役澤敏雄氏にも深く感謝いたします。

そして論文に挑戦するきっかけを作って下さったペンシルベニア州立大学名誉教授 John J. Henry 博士と James C. Wambold 博士には特に深く感謝します。

論文完成には建設省菊川滋氏（元土木研究所主任研究員）、日本道路公団七五三茂博士（元試験研究所舗装研究室長）、サントップテクノ株式会社顧問山下弘美氏（元日本道路株式会社技術研究所長）には適切な助言くださり、ご指導頂き深く感謝する次第であります。

そして大学関係、研究機関の方々、特に日本舗道株式会社、鹿島道路株式会社、日本道路株式会社、前田道路株式会社、大成ロテック株式会社など各道路会社の特に試験所長様方には研究を遂行するに際してはいろいろお世話になり、感謝する次第であります。その他多くの皆様方のお蔭であることを申し添えて、その方々へも感謝申し上げる次第です。

最後に、この論文の作成の手助けをして下さった金亀建設株式会社玉井昭典試験室長と室蘭工業大学大学院山本賢二氏にも深く感謝します。そして私の PTA として私を最後まで励まし、支えてくれた妻裕子にも心から感謝するものであります。

2000年3月吉日

安 部 裕 也

